পরমাণু ও কেন্দ্রীন

পরমাণু ও কেন্দ্রীন

[ATOMIC AND NUCLEAR PHYSICS]

ডঃ দেবদাস বন্দ্যোপাধ্যায়
পদার্থবিদ্যা বিভাগ, দিল্লী বিশ্ববিদ্যালয়

পশ্চিমবঙ্গ রাজ্য পুস্তক পর্ষদ
(পশ্চিমবঙ্গ সরকারের একটি সংস্থা)

উৎসর্গ

৺সুরেন্দ্রনাথ বন্দ্যোপাধ্যায়

৺ঐশ্বর্য্যময়ী দেবী

ভূমিকা

পশ্চিমবঙ্গ সরকারের আনুকূল্যে সম্প্রতি বাংলাভাষায় আধুনিক বিজ্ঞান সম্পর্কিত উচ্চস্তরের পুস্তকাবলী প্রকাশের প্রচেষ্টা শুরু হয়েছে, 'পরমাণু ও কেন্দ্রীন' বইটি এই প্রচেষ্টারই একটি ক্ষুদ্র অঙ্গ। স্নাতকস্তরের পদার্থবিদ্যার ছাত্রদের উপযোগী হবে এমন ধারণা নিয়েই এই বইয়ের বিষয়বস্তু সংকলনের চেষ্টা করা হয়েছে, তবে অতিরিক্ত তথ্য সমাবেশের মধ্যে না গিয়ে গুরুত্বপূর্ণ বিষয়গুলির প্রাঞ্জল বিশ্লেষণের দিকেই বেশী জোর দেওয়া হয়েছে। পরমাণু ও কেন্দ্রীনের আলোচনায় আরও নানা তথ্যাবলী সংযোজিত হলে সম্ভবতঃ পুস্তকের ব্যবহারিক মূল্য বৃদ্ধি পেত, কিন্তু স্থানাভাবে তা করা সম্ভব হয়নি। তবে বিভিন্ন বিশ্ববিদ্যালয়গুলির পদার্থবিদ্যার সাম্মানিক পাঠক্রমের পরমাণু ও কেন্দ্রীন সংক্রান্ত আলোচ্য বিষয়গুলি অধিকাংশই এই বইতে অন্তর্ভুক্ত হয়েছে। সর্ব্বশেষ অধ্যায়ে মহাজাগতিক রশ্মি ও অধুনা আবিষ্কৃত মৌলিক কণাদের একটি সংক্ষিপ্ত বিবরণ দেওয়া হয়েছে, এই অধ্যায়টি কেন্দ্রীন বিজ্ঞানের পরবর্ত্তী ধাপের পরীক্ষা-নিরীক্ষাগুলি সম্বন্ধে শিক্ষার্থীদের কিছু পরিমাণে অবহিত করবে। উচ্চ-মাধ্যমিক স্তরের পদার্থবিদ্যার সঙ্গে পূর্ব্বপরিচয় এবং ক্যালকুলাসের কিছু ব্যবহারিক জ্ঞান, এই বইয়ের আলোচ্য বিষয়গুলি অনুধাবনের পক্ষে এগুলিই পর্য্যাপ্ত ব'লে বিবেচিত হবে। প্রমাণাদি এবং বিবরণ সর্ব্বত্রই সাধ্যমত সরল এবং স্বয়ংসম্পূর্ণ করার চেষ্টা করা হয়েছে, শিক্ষার্থীরা যেন নিজেদের ব্যক্তিগত পঠন-পাঠনের মাধ্যমেই বিষয়বস্তুগুলি অনুধাবন করতে পারেন বইয়ের সর্ব্বত্রই এই লক্ষ্যের প্রতি জোর দেওয়া হয়েছে।

পরলোকগত জাতীয় অধ্যাপক সত্যেন্দ্রনাথ বসু আমাদের এই প্রচেষ্টা সম্বন্ধে অবগত ছিলেন, তাঁর আশ্বাস এবং উপদেশ আমাদের গভীরভাবে অনুপ্রাণিত করেছে। তাঁর আত্মার উদ্দেশে আমরা শ্রদ্ধা ও কৃতজ্ঞতা নিবেদন করছি।

পশ্চিমবঙ্গ রাজ্য পুস্তক পর্ষদের সহায়তা না পেলে এই বই প্রকাশ করা সম্ভব হ'ত না। পর্ষদের মুখ্য প্রশাসন আধিকারিক শ্রী অবনী মিত্র বইটি সম্বন্ধে যে গভীর আগ্রহ দেখিয়েছেন তার জন্য তাঁর কাছে আমরা অশেষ ঋণী। তাঁর সাহায্য ও আন্তরিকতা সবসময়ই আমাদের গভীরভাবে স্পর্শ করেছে। অধ্যাপক অমল রায়চৌধুরী পাণ্ডুলিপিটি যত্নসহকারে পরীক্ষা ক'রে নানারকম

ত্রুটি-বিচ্যুতি এবং সম্ভাব্য উন্নতিসাধনের প্রতি আমাদের দৃষ্টি আকর্ষণ করেছেন, তাঁকে আমরা আন্তরিক ধন্যবাদ জানাচ্ছি। ডাঃ বাসন্তীদুলাল নাগচৌধুরী প্রকাশনের ব্যাপারে আমাদের সুপরামর্শ দিয়েছেন এবং সাহায্য করেছেন এজন্য তাঁর কাছে আমরা কৃতজ্ঞ।

বইটি সম্বন্ধে গভীর আগ্রহ প্রকাশ করেছেন শ্রী প্রবীর গাঙ্গুলী, অধ্যাপক চিত্তরঞ্জন দাশগুপ্ত, শ্রী সমরেন্দ্রনাথ সেন, অধ্যাপক মধুময় চৌধুরী এবং শ্রী কেশব বন্দ্যোপাধ্যায়, পশ্চিমবঙ্গ রাজ্য পুস্তক পর্ষদের কর্মিবৃন্দ নানাভাবে আমাদের কাজে সহায়তা করেছেন, শ্রী রবীন্দ্রনাথ সহীস যত্নসহকারে এই বইয়ের ছবিগুলি এঁকেছেন; এঁদের সবাইকে আমাদের আন্তরিক ধন্যবাদ জানাচ্ছি। কে. পি. বসু প্রিন্টিং ওয়ার্কস-এর কর্মিবৃন্দের কাছে তাঁদের ধৈর্য্য ও সহযোগিতার জন্য কৃতজ্ঞতা স্বীকার করছি।

সহযোগিতা এবং সমালোচনার জন্য আমার স্ত্রী শ্রীমতী অনিমা বন্দ্যোপাধ্যায় বিশেষ ধন্যবাদার্হ। দিল্লী বিশ্ববিদ্যালয়ের ছাত্রছাত্রী, অধ্যাপক এবং সহকর্মিবৃন্দ যাঁরা সবসময়ই তাঁদের সান্নিধ্য ও সহানুভূতির দ্বারা আমাদের উৎসাহিত করেছেন, তাঁদের সবাইকেই এই প্রসঙ্গে কৃতজ্ঞতার সঙ্গে স্মরণ করছি।

দিল্লী
২রা জুলাই, ১৯৭৫

দেবদাস বন্দ্যোপাধ্যায়

বিষয়সূচী

প্রথম অধ্যায়

বস্তুজগতের গঠনবিশ্লেষণে পরমাণুর কল্পনা অতি প্রাচীন, গ্রীক দার্শনিক ডিমোক্রিটাস (Democritus) এবং ভারতীয় দার্শনিক কণাদ যাবতীয় বস্তুর গঠনে এক ক্ষুদ্রতম অবিভাজ্য অংশের . কল্পনা করেছিলেন যাকে আধুনিক প্রচলিত নামকরণের সঙ্গে সামঞ্জস্য রেখে বলা যেতে পারে "পরমাণু"। কিন্তু কণাদ বা ডিমোক্রিটাস কারো পরমাণুতত্ত্বই আধুনিক বিজ্ঞানসম্মত নয়, কারণ এদের তত্ত্বে পরমাণুদের ভৌত বা রাসায়নিক প্রকৃতি সম্বন্ধে উপযুক্ত কোন বৈজ্ঞানিক অনুসন্ধান করা হয়নি। বিজ্ঞানসম্মত পরমাণুতত্ত্বের প্রচার প্রথম করেন ইংরেজ বিজ্ঞানী ড্যালটন (Dalton) গত ঊনবিংশ শতাব্দীর প্রথমভাগে, যদিও ড্যালটনের আগেই রবার্ট বয়েল (Robert Boyle) এবং ড্যানিয়েল বার্ণৌলি (Daniel Bernoulli) পরমাণুর অস্তিত্ব সম্বন্ধে বিজ্ঞানসম্মত আলোচনা করেছেন। এইসব তত্ত্ব অনুযায়ী জগতের যাবতীয় মৌলিক পদার্থ কতকগুলি পরমাণুর সমষ্টি, পরমাণু হ'ল মৌলের ক্ষুদ্রতম অবিভাজ্য অংশ যার ভিতর ঐ মৌলের সমস্ত রাসায়নিক গুণাবলী বর্তমান। বিভিন্ন মৌলিক পদার্থের পরমাণুগুলির প্রকৃতি বিভিন্ন। পরমাণুগুলি অনেক সময়ই স্বাধীন ও এককভাবে অবস্থান না করে আরও অন্যান্য মৌলের পরমাণুর সঙ্গে রাসায়নিক উপায়ে মিলিত অবস্থায় অবস্থান করে, এইভাবে একাধিক বিভিন্ন পরমাণুর রাসায়নিক মিলনে একটি "অণু" উৎপন্ন হয়। অণু যাবতীয় যৌগিক পদার্থের একক ; তবে অণু যেহেতু একাধিক পরমাণুর রাসায়নিক সমন্বয়ে গঠিত, রাসায়নিক বা ভৌত প্রক্রিয়ায় সহজেই একে বিভিন্ন পরমাণুতে বিশ্লিষ্ট করে ফেলা যায়। ড্যালটনের সময় রাসায়নিক বিক্রিয়ার কতকগুলি পরীক্ষালব্ধ সূত্র বিজ্ঞানীদের জানা ছিল এবং সেগুলি উক্ত পরমাণুতত্ত্বের সাহায্যে সহজেই ব্যাখ্যা করা সম্ভব।

পরমাণু-বিজ্ঞানে ড্যালটনের প্রকল্পের পরবর্তী পদক্ষেপ হ'ল এ্যাভোগাড্রো-প্রকল্প। এই প্রকল্প অনুসারে হাইড্রোজেন, অক্সিজেন প্রভৃতি গ্যাসীয় মৌলিক পদার্থের মধ্যে পরমাণুগুলি মুক্ত অবস্থায় থাকে না। একই মৌলের একাধিক পরমাণু একত্রিত হয়ে এক একটি অণুর সৃষ্টি করে এবং স্বাভাবিক অবস্থায় এই গ্যাসগুলি হ'ল শুধু এইরকম অণুর সমষ্টি। অর্থাৎ অণু সবসময় শুধু যৌগিক পদার্থেরই একক নয়, অনেক মৌলিক পদার্থেরও

একক হচ্ছে অণু বা ঐ মৌলেরই কতকগুলি পরমাণুর সমন্বয়ে গঠিত। রাসায়নিক বিক্রিয়ার সময় অবশ্য এই অণুগুলি ভেঙে গিয়ে এদের মধ্য থেকে পরমাণু নির্গত হতে পারে। নানাধরণের রাসায়নিক পরীক্ষার নিঃসন্দেহে প্রমাণিত হয়েছে যে হাইড্রোজেন, অক্সিজেন, নাইট্রোজেন, ক্লোরিণ প্রভৃতি গ্যাসের অণুতে দুটি করে পরমাণু থাকে। গ্যাসীয় মৌলের এই আণবিক গঠন বর্ণালী-বিশ্লেষণের দ্বারাও প্রমাণ করা যায়, অণুর দ্বারা সৃষ্ট বর্ণালী ও পরমাণুজাত বর্ণালীর প্রকৃতির মধ্যে কিছু পার্থক্য আছে এবং বর্ণালী লক্ষ্য করে বলা যায় তা অণু অথবা পরমাণু থেকে উদ্ভূত হচ্ছে কিনা। এভাবেও প্রমাণিত হয়েছে যে হাইড্রোজেন, অক্সিজেন প্রভৃতি কতকগুলি গ্যাস দুই-পরমাণু-সমন্বিত অণুতে গঠিত। তবে উল্লেখযোগ্য যে হিলিয়াম, নিওন, জেনন (Xenon) ইত্যাদি নিষ্ক্রিয় গ্যাসগুলিতে পরমাণুগুলি মুক্ত অবস্থায় থাকে—কোন অণু সৃষ্টি করে না।

পারমাণবিক ওজন ও এ্যাভোগাড্রো সংখ্যা

এ্যাভোগাড্রোর মূল প্রকল্পটি হ'ল এই, "একই চাপ ও তাপমাত্রায় বিভিন্ন গ্যাসের সমপরিমাণ ঘনায়তনে সমসংখ্যক অণু থাকবে"। এই প্রকল্পের সাহায্যে পরমাণুদের আপেক্ষিক ওজন নির্ণয় করা সহজ। তাপমাত্রা ও চাপ সমান থাকলে যেহেতু সমঘনায়তন-বিশিষ্ট দুই বিভিন্ন গ্যাসের ভিতর সমসংখ্যক অণু থাকে, সুতরাং এই দুই পরিমাণ গ্যাসের ওজনের যে অনুপাত তাই হ'ল ঐ গ্যাসদ্বয়ের অণুর ওজনের অনুপাত। গ্যাসদ্বয় যদি অক্সিজেন ও হাইড্রোজেন হয় তবে

$$\frac{\text{অক্সিজেনের ওজন}}{\text{হাইড্রোজেনের ওজন}} = \frac{O_2 \text{ অণুর ওজন}}{H_2 \text{ অণুর ওজন}} = \frac{O \text{ পরমাণুর ওজন}}{H \text{ পরমাণুর ওজন}}$$

পরীক্ষার এই অনুপাতের যে মান নির্ণীত হয় তা হ'ল 15·873। বিভিন্ন পরমাণুর আপেক্ষিক ওজন নির্ণয় করতে হলে একটি নির্দিষ্ট পরমাণুকে মানক হিসাবে ধরে নিতে হয়, রসায়নবিদেরা এজন্য প্রকৃতিলব্ধ অক্সিজেনের পরমাণুকে মানক হিসাবে ধরেন, অক্সিজেনের একটি পরমাণুর আপেক্ষিক ওজন ধরা হয় 16·0000। এই মানক অনুসারে হাইড্রোজেন পরমাণুর আপেক্ষিক ওজন 1·008। অণুদের আপেক্ষিক ওজনকে বলা হয় আণবিক ওজন, তা হ'ল অণুর ভিতর অবস্থিত বিভিন্ন পরমাণুর আপেক্ষিক ওজনের যোগফল। এইভাবে সংজ্ঞারিত পারমাণবিক অথবা আণবিক ওজন একটি অনুপাতমাত্র সুতরাং মাত্রাবিহীন। অবশ্য এই পদ্ধতি ব্যবহার করে পারমাণবিক ওজনের খুব বেশী শুদ্ধ পরিমাণ নির্ণয় করা যায় না, এর কারণ

অন্যান্য গ্যাসসূত্রের মতো এ্যাভোগাড্রোর সূত্রও সম্পূর্ণ নির্ভুল নয়। সামান্য পরিমাণে হলেও গ্যাসের অণুগুলির ভিতর কিছুমাত্রায় পারস্পরিক আকর্ষণ বর্তমান থাকে এবং এই আকর্ষণের পরিমাণ বিভিন্ন অণুর মধ্যে বিভিন্ন। আণবিক আকর্ষণের অস্তিত্ব গ্যাসসূত্রসমূহকে বিশেষভাবে প্রভাবিত করতে পারে এজন্য কোন গ্যাসসূত্র, যেমন এ্যাভোগাড্রো সূত্র, সমস্ত গ্যাসের জন্য সমান নির্ভুল হতে পারে না। পরবর্তী অধ্যায়ে আমরা পারমাণবিক ওজন নির্দ্ধারণের অনেক বেশী নির্ভুল পদ্ধতির বিবরণ দেব।

আণবিক ওজনকে গ্রামে প্রকাশ করলে তাকে বলা হয় গ্রাম অণু, যেমন এক গ্রাম অণু অক্সিজেন বলতে বোঝায় 32·00 গ্রাম অক্সিজেন, এক গ্রাম অণু হাইড্রোজেন হ'ল 2·016 গ্রাম হাইড্রোজেন ; একই অর্থে গ্রাম পরমাণু কথাটিও ব্যবহৃত হয়। গ্রাম অণু এককটি বিশেষ তাৎপর্য্যপূর্ণ। কারণ, যেহেতু আণবিক ওজন আপেক্ষিক ওজন মাত্র যেকোন পদার্থেরই এক গ্রাম অণু পরিমাণে সমসংখ্যক অণু থাকবে। ধরা যাক কোন পদার্থের একটি অণুর সত্যিকারের ওজন m গ্রাম, এক গ্রাম অণু পরিমাণের ওজন M গ্রাম এবং মনে করা যাক এক গ্রাম অণুর ভিতর মোট অণুর সংখ্যা N_0, সুতরাং

$$N_0 = M/m = 32 \text{ গ্রাম/অক্সিজেন অণুর ওজন (গ্রাম)}$$

বর্তমানে নানা পরীক্ষায় একটি অক্সিজেন অণু বা পরমাণুর যথার্থ ওজন নির্ণয় করা সম্ভব, সুতরাং তাথেকে উপরোক্ত সম্বন্ধ ব্যবহার করে N_0 নির্ণয় করা যায়। আরও নানারকম পরীক্ষায় N_0 নির্ণীত হয়, একে বলা হয় এ্যাভোগাড্রো সংখ্যা, এর মান হ'ল,

$$N_0 = 6{\cdot}0248 \times 10^{23}/\text{গ্রাম অণু}$$

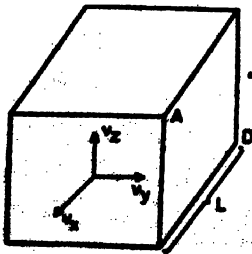
ফ্যারাডের পরীক্ষা থেকে আমরা জানি যে, যেসব মৌলের যোজ্যতা এক তাদের এক গ্রাম অণু পরিমাণ তড়িৎবিশ্লেষণের দ্বারা পৃথক করতে হলে এক নির্দিষ্ট ধ্রুব পরিমাণের বিদ্যুৎ প্রবাহিত হওয়া প্রয়োজন, এই পরিমাণকে বলা হয় এক ফ্যারাডে, 1 ফ্যারাডে = 96,522 কুলম্ব। তেমনি দুই যোজ্যতা-বিশিষ্ট আয়নদের এক গ্রাম অণুর জন্য প্রয়োজন হয় 2 ফ্যারাডে, তিন যোজ্যতাবিশিষ্ট আয়নদের ক্ষেত্রে 3 ফ্যারাডে, ইত্যাদি। আমরা জানি যে দ্রবণের মধ্যে অবস্থিত বিভিন্ন আয়নগুলিই তড়িৎবিশ্লেষণের সময় অধঃক্ষিপ্ত হয়। কিন্তু প্রত্যেকপ্রকার আয়নে আধানের পরিমাণ সমান থাকে না, যে সমস্ত মৌলের যোজ্যতা এক, যেমন সোডিয়াম, পটাসিয়াম ইত্যাদি, দ্রবণের ভিতর এদের আয়নে আধানের পরিমাণ যদি e হয় তবে দুই যোজ্যতাবিশিষ্ট আয়ন যেমন ক্যালসিয়াম, ম্যাগনেসিয়াম প্রভৃতি ধাতুর আয়নে আধানের পরিমাণ হবে $2e$ এবং এদের গ্রাম পরমাণু ওজনের মৌল

পৃথক করতে আধানের পরিমাণ প্রয়োজন হবে N_0e, $2N_0e$, ··· ইত্যাদি। সুতরাং

$$N_0e = 96{,}522 \text{ কুলম্ব}$$

ফ্যারাডের পরীক্ষা থেকে সুস্পষ্ট প্রমাণ হয় যে জগতে e-এর তুলনায় ক্ষুদ্রতর আধানের অস্তিত্ব নেই এবং অন্যান্য সমস্ত আধানই e-এর অখণ্ড সংখ্যক গুণিতক। এইভাবে আধানের পারমাণবিক প্রকৃতি সুপ্রতিষ্ঠিত হয়। যেহেতু ফ্যারাডের সূত্রগুলি ধন এবং ঋণ উভয়বিধ আয়নের ক্ষেত্রেই প্রযোজ্য, সুতরাং উভয় প্রকার আধানেরই ক্ষুদ্রতম অবিভাজ্য অংশ হল e। অথবা e যে কোন একটির পরিমাণ জানা যায় যদি অপরটি জানা থাকে, পরবর্ত্তী অধ্যায়ে আমরা e-এর পরিমাপন পদ্ধতি সম্বন্ধে আলোচনা করব।

পরমাণু এবং গ্যাসসমূহের বলবিজ্ঞান

পরমাণুতত্ত্ব অনুযায়ী কোন গ্যাস কতকগুলি অণুর সমষ্টিমাত্র, নির্দ্দিষ্ট তাপমাত্রায় এই অণুগুলির ভিতর কিছু তাপীয় শক্তি সঞ্চারিত থাকে। এই তাপীয় শক্তি সাধারণতঃ অণুগুলির গতিশক্তিরূপে প্রতিভাত থাকে এবং এর প্রভাবে এরা আধারের ভিতর ইতস্ততঃ চলে বেড়ায়। ইতস্ততঃ ভ্রমণের সময় অণুগুলি পরস্পরের সঙ্গে ধাক্কা খায় এবং আধারের দেওয়ালেও আঘাত করে। এরকম সহজেই অনুমান করা যায় যে কোন নির্দ্দিষ্ট পরিমাণ ভর-সমন্বিত গ্যাসের যে সমস্ত ধর্ম্মগুলি বর্ত্তমান যেমন, এর চাপ, তাপমাত্রা এবং আয়তন, এগুলি ঐ গ্যাসস্থ অণুগুলির ক্রিয়াকলাপের উপরই নির্ভর করবে। অণুগুলির উপর বলবিজ্ঞানের সূত্রসমূহ প্রয়োগ করে দেখান যায় যে শুধু এদের গতির প্রকৃতি অনুধাবন করেই গ্যাসের চাপ, তাপমাত্রা ও ঘনায়তনের ভিতর পারস্পরিক সম্পর্ক নির্দ্ধারণ করা যায়। গাণিতিক পদার্থবিজ্ঞানের যে শাখায় এই বিষয় নিয়ে আলোচনা করা হয় তাকে বলা হয় গ্যাসসমূহের বলবিজ্ঞান, এতে গ্যাসের যাবতীয় ভৌতিক ধর্ম্মাবলী প্রতিটি অণুর একক আচরণের সম্মিলিত ফল হিসাবে ব্যাখ্যা করা হয়।

চিত্র 1·1

ধরা যাক কোন চৌপলাকৃতি একটি প্রকোষ্ঠে (দৈর্ঘ্য L) নির্দ্দিষ্ট চাপে ও তাপমাত্রায় কিছু গ্যাস রয়েছে (চিত্র 1·1)। পরস্পর উলম্ব তিনটি অক্ষের দিকে গ্যাসের যে কোন একটি

অণুর গতিবেগের উপাংশগুলি যথাক্রমে v_x, v_y এবং v_z। সহজেই দেখান যায় গড়ে এই উপাংশগুলির বর্গের মান পরস্পর সমান।

$$\bar{v}_x^2 = \bar{v}_y^2 = \bar{v}_z^2 = \tfrac{1}{3}\bar{v}^2$$

$\bar{v}$-কে বলা হয় বর্গমূল গড় বর্গ-গতিবেগ। পাত্রটির ভিতর চাপের পরিমাণ $\bar{v}$-এর মাধ্যমে নিম্নলিখিত সূত্রের দ্বারা প্রকাশ করা যায়

$$P = Nm\bar{v}^2/3L^3 = \rho\bar{v}^2/3$$

N ঐ প্রকোষ্ঠের ভিতর মোট অণুর সংখ্যা, m এক-একটি অণুর ভর এবং ρ গ্যাসের ঘনত্ব। $L^3 = V$ সুতরাং

$$PV = \tfrac{1}{3}M\bar{v}^2 \qquad \cdots \qquad \cdots \qquad 1{\cdot}1$$

এখানে M গ্যাসের মোট ভর। লক্ষ্যণীয় যে 1·1 সম্বন্ধটি বয়েলের সূত্র PV = ধ্রুবক ছাড়া আর কিছুই নয়, কারণ নির্দিষ্ট তাপমাত্রায় বর্গমূল গড় বর্গ-গতিবেগ একটি ধ্রুবক। গ্যাস-বলবিজ্ঞানের সাহায্যে এভাবে বয়েলের পরীক্ষালব্ধ সূত্রটি প্রমাণ করা যায়, এই প্রমাণ প্রথম উত্থাপন করেন বার্ণৌলি। অবশ্য উল্লেখযোগ্য যে 1·1 সূত্রটি প্রতিষ্ঠা করতে গিয়ে সাধারণতঃ ভৌত পরিস্থিতি অনেক সরল করে ফেলা হয়ে থাকে, যেমন গ্যাসের অণুগুলির আয়তন এবং এদের ভিতর পারস্পরিক আকর্ষণ অবহেলা করা হয়, আরও শুদ্ধতর গ্যাসসূত্র পেতে হলে ঐগুলির প্রভাবও বিবেচনা করতে হবে।

1·1 সূত্রটি প্রয়োগ করে গ্যাসের অণুগুলির বর্গমূল গড় বর্গ-গতিবেগ সহজেই নির্দ্ধারণ করা সম্ভব। ধরা যাক স্বাভাবিক মানের চাপ ও তাপমাত্রায় হাইড্রোজেন গ্যাস, এই অবস্থায় হাইড্রোজেনের ঘনত্ব 0·00009 গ্রাম/সিসি এবং চাপ $76 \times 13{\cdot}6 \times 980$ ডাইন/সেমি^{2}, অতএব

$$\bar{v}^2 = \frac{3P}{\rho} = \frac{3 \times 76 \times 13{\cdot}6 \times 980}{0{\cdot}00009} = 3{\cdot}38 \times 10^{10} \text{ (সেমি/সেক)}^2$$

$$\bar{v} = 1840 \text{ মিটার/সেক}$$

অর্থাৎ প্রতি সেকেণ্ডে এক মাইলেরও বেশী।

গ্যাসের অণুগুলির মোট গতিশক্তির পরিমাণ হবে

$$U = \tfrac{1}{2}Nm\bar{v}^2 = \tfrac{1}{2}M\bar{v}^2$$

সুতরাং 1·1 সূত্রটিকে আমরা লিখতে পারি

$$PV = \tfrac{2}{3}U.$$

বয়েল ও চার্লসের সূত্র থেকে এক গ্রাম অণু গ্যাসের ক্ষেত্রে

$$PV = RT$$

এখানে R সার্বিক গ্যাস ধ্রুবক এবং T পরম বা কেলভিন তাপমাত্রা, সুতরাং

$$U = \frac{3}{2}RT$$

অর্থাৎ আমরা দেখতে পাই যে গ্যাসের পরম তাপমাত্রা T, এর অণুগুলির মোট গতিশক্তির সমানুপাতী। এইভাবে তাপমাত্রার বিমূর্ত ধারণাটির একটি বাস্তব সংজ্ঞা দেওয়া যায়।

একটি অণুর গড় গতিশক্তির জন্য আমরা পাই,

$$E = U/N_0 = \frac{3}{2}kT \quad \cdots \quad \cdots \quad 1{\cdot}2$$

k হল বোল্‌ট্‌জম্যান ধ্রুবক। এর মান

$$k = R/N_0 = 1{\cdot}38 \times 10^{-16} \text{ আর্গ}/^{\circ}K$$

লক্ষণীয় যে একটি অণুর গড় গতিশক্তি নির্ভর করে শুধু এর পরম তাপমাত্রার উপর, অণুটির ভর বা অন্যান্য ধর্ম্মাবলী যাই হউক না কেন।

1·2 সূত্রে যে 3 সংখ্যাটি আসছে তার কারণ অণুগুলির গতিবেগের তিনটি উপাংশের প্রতিটির জন্য আমরা ধরে নিয়েছি যে তাদের বর্গের গড় পরস্পর সমান, এজন্য মোট শক্তির পরিমাণে তাদের অবদান হবে গড়ে সমান। এই ধারণা খুবই স্বাভাবিক যদি আমরা ধরে নিই যে অণুগুলির আকৃতি অনেকটা জ্যামিতিক বিন্দুর মতো এবং তিনটি অক্ষের দিকে গতিবেগের তিনটি উপাংশ ছাড়া এদের অন্য কোন রকমের গতিশীলতা নেই। কিন্তু সাধারণভাবে একটি অণুর তিনরকম চলন গতি ছাড়াও আরও অন্যান্য ধরণের গতি থাকতে পারে। শক্তি সমবিভাজন নীতি যা গ্যাস-বলবিজ্ঞানের একটি অন্যতম গুরুত্বপূর্ণ নীতি, এর অনুসারে প্রত্যেক প্রকারের গতিশক্তির গড় পরিমাণ সমান যেমন পূর্ব্বের উদাহরণে গতিবেগের x উপাংশের জন্য গড়ে যে শক্তি, y এবং z উপাংশের জন্য গড় শক্তির পরিমাণ ঠিক একই। দুই-পরমাণু-বিশিষ্ট একটি অণুকে একটি ডাম্বেল হিসাবে কল্পনা করা যায় যেখানে দুটি বিন্দুপ্রমাণ পরমাণু একটি অনমনীয় দণ্ডের সাহায্যে যুক্ত। মনে করা যাক x-অক্ষটি ঐ সংযোগ-দণ্ডের বরাবর ধরা হয়েছে, x, y এবং z এই তিনটি অক্ষের দিকেই অণুটির সরল গতি থাকবে, তাছাড়া y এবং z অক্ষের চারপাশে এর ঘূর্ণনজনিত গতিশক্তিও থাকে, তবে পরমাণুগুলিকে বিন্দুপ্রমাণ ধরার ফলে x-অক্ষের চতুর্দিকে ঘূর্ণনজনিত গতিশক্তির পরিমাণ শূন্য। সুতরাং আমরা দেখি যে দুই-পরমাণু-বিশিষ্ট অণুর গতিশক্তির পাঁচরকম প্রকারভেদ থাকতে পারে। শক্তি সমবিভাজন নীতির বক্তব্য অনুযায়ী প্রত্যেক প্রকারভেদেই গড় শক্তির পরিমাণ অভিন্ন এবং যেহেতু সরলগতির একটি অংশের জন্য

গড় শক্তির পরিমাণ $\frac{1}{2}kT$, সুতরাং দুই-পরমাণু-বিশিষ্ট অণুর মোট শক্তির পরিমাণ $\frac{5}{2}kT$। যদি আমরা অণুটির ভিতর স্পন্দনজনিত শক্তির অস্তিত্ব স্বীকার করি তাহলে শক্তির প্রকারভেদ আরও বৃদ্ধি পায়। তবে অপেক্ষাকৃত কম তাপমাত্রায় অণুগুলির ভিতর স্পন্দনজনিত শক্তির পরিমাণ শূন্যই থাকে। অধিকসংখ্যক পরমাণুবিশিষ্ট অণুতে শক্তির প্রকারভেদ বহুসংখ্যক হতে পারে।

সাধারণভাবে, এক গ্রাম অণু গ্যাসের মোট শক্তির জন্য আমরা লিখতে পারি

$$U = sRT \qquad 1\cdot3$$

এখানে s হল শক্তির প্রকারভেদের সংখ্যা। এই সূত্রটি ব্যবহার করে কোন গ্যাসের আপেক্ষিক তাপ মাপা সম্ভব এবং তাথেকে এই সূত্রটির যথার্থতা পরীক্ষামূলকভাবে নানাক্ষেত্রে প্রমাণ করা সম্ভব হয়েছে। উদাহরণ হিসাবে, 1·3 সূত্র থেকে ধ্রুব ঘনায়তনে আপেক্ষিক তাপের মান হিসাবে আমরা পাই

$$C_v = \frac{s}{2} R$$

$R = 2$ ক্যালোরী/(গ্রাম অণু °K)। He গ্যাসের ক্ষেত্রে $s = 3$ এবং $C_v = 3$ ক্যালোরী/(গ্রাম অণু °K)। H_2, O_2, N_2 ইত্যাদি দুই-পরমাণু-বিশিষ্ট অণুসমন্বিত গ্যাসের ক্ষেত্রে $s = 5$ এবং $C_v = 5$ ক্যালোরী/(গ্রাম অণু °K)। পরীক্ষার সাহায্যে এই মানগুলির যথার্থতা প্রমাণিত হয়েছে।

শক্তি সমবিভাজন নীতির দ্বারা গ্যাসগুলির প্রকৃতি সম্বন্ধে আরও অনেক প্রয়োজনীয় সিদ্ধান্তে উপনীত হওয়া যায়। মনে করা যাক একটি পাত্রের ভিতর নির্দিষ্ট তাপমাত্রায় দুইরকম গ্যাসের মিশ্রণ রয়েছে যাদের অণুগুলির ভর যথাক্রমে m_1 এবং m_2 এবং v_1 ও v_2 যথাক্রমে এদের বর্গমূল গড় বর্গ-গতিবেগ। শক্তি সমবিভাজন নীতির সাহায্যে আমরা লিখতে পারি

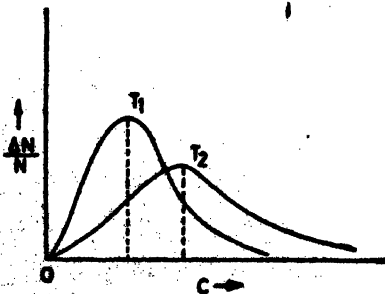
$$\frac{3}{2}kT = \frac{1}{2}m_1\bar{v}_1^2 = \frac{1}{2}m_2\bar{v}_2^2$$

$$\frac{\bar{v}_2}{\bar{v}_1} = \sqrt{m_1/m_2}. \qquad \ldots \qquad \ldots \qquad 1\cdot4$$

অর্থাৎ অণুগুলির বর্গমূল গড় বর্গ-গতিবেগ এদের ভরের বর্গমূলের ব্যস্ত অনুপাতী। যদি এই গ্যাসের মিশ্রণটি একটি সুষির দেওয়ালের ভিতর দিয়ে অভিব্যাপ্ত হয় তাহলে হাল্কা গ্যাসটি, যেহেতু এর অণুগুলির গতিবেগ অধিক, অপেক্ষাকৃত দ্রুত অভিব্যাপ্ত হবে। এটি একটি অত্যন্ত গুরুত্বপূর্ণ সিদ্ধান্ত কারণ এই পদ্ধতি অনুসরণ করে মিশ্রণের ভিতর থেকে বিভিন্ন গ্যাসকে শুধুমাত্র ভৌত উপায়ে পৃথক করা যায়। 1·4 সূত্রটির প্রয়োগের বিষয়ে পরবর্তী একটি অধ্যায়ে আলোচনা করা হবে।

ম্যাকস্‌ওয়েলের (Maxwell) গতিবেগ বণ্টন সূত্র

নির্দিষ্ট চাপ, তাপমাত্রা এবং ঘনায়তনবিশিষ্ট কোন পরিমাণ গ্যাসের ভিতর অণুগুলির বিভিন্ন মানের গতিবেগ থাকতে পারে। কিভাবে অণুগুলির ভিতর গতিবেগ বিতরিত থাকে সেই জ্ঞান পদার্থবিদ্যার নানা সমস্যার ক্ষেত্রে বিশেষ প্রয়োজনীয়। আশা করা যায় যে, গ্যাসের অণুগুলির গতিবেগ কোন একটি বিশেষ সূত্র অনুসারে বিতরিত থাকবে এবং প্রত্যেক প্রকার গ্যাসের জন্য একই বণ্টন সূত্র পালিত হবে। গতিবেগ (velocity) অথবা বেগের বণ্টন বলতে আমরা বুঝি কোন নির্দিষ্ট তাপমাত্রায় নির্দিষ্ট পরিমাণ গ্যাসের ভিতর c এবং $c+\Delta c$ গতিবেগদ্বয়ের মধ্যবর্ত্তী-গতিবেগ-বিশিষ্ট কতগুলি অণু থাকবে সেই হিসাবে। সাধারণ অভিজ্ঞতা থেকে আমরা আশা করি যে, খুব কম অথবা খুব বেশী গতিবেগ সমন্বিত অণুর সংখ্যা অপেক্ষাকৃত কম হবে। অধিকসংখ্যক অণুরই একটা মাঝামাঝি গতিবেগ থাকবে যাকে আমরা সবচেয়ে সম্ভাব্য গতিবেগ আখ্যা দিতে পারি। তাছাড়া এই সবচেয়ে সম্ভাব্য গতিবেগের মান তাপমাত্রার সঙ্গে সঙ্গে ক্রমাগত বৃদ্ধি পেতে থাকবে তাও আশা করা যায়। বিজ্ঞানী ম্যাকস্‌ওয়েল সর্ব্বপ্রথম গ্যাসের অণুগুলির গতিবেগ বণ্টনের সূত্রটি আবিষ্কার করেন, তবে গতিবেগ বণ্টনের তুলনায় বেগ বণ্টনের সূত্রটি অপেক্ষাকৃত সরলতর এবং এটি লেখ হিসাবে 1·2 চিত্রে দেখান হয়েছে। লেখদ্বয়ের ভিতরে $\Delta N/N$ রাশিটিকে অণুগুলির বেগের (speed) অপেক্ষক হিসাবে প্রকাশ করা হয়েছে অর্থাৎ ΔN হ'ল সেইসব অণুর সংখ্যা যাদের বেগ c এবং $c+\Delta c$ এর মধ্যে থাকে। N আধারের ভিতর গ্যাসের অণুগুলির মোট সংখ্যা সুতরাং $\Delta N/N$ রাশিটি একটি অণুর বেগ c এবং $c+\Delta c$ এর মধ্যে থাকার সম্ভাব্যতা প্রকাশ করে। ম্যাকস্‌ওয়েলের বেগ বণ্টন সূত্রটি নিম্নরূপ

$$\Delta N/N = \frac{4c^2}{\sqrt{\pi}(2kT/M)^{3/2}} \exp.\left\{-\frac{Mc^2}{2kT}\right\}\Delta c \quad \cdots \quad 1·5$$

চিত্র 1·2—গ্যাসের পরমাণুগুলির ম্যাকস্‌ওয়েলীয় বেগ বিভাগ।

এখানে M অণুর ভর এবং T পরম তাপমাত্রা।

সূত্রটির গঠন থেকে স্পষ্টই প্রতীয়মান হয় যে অত্যধিক কিংবা অত্যল্প বেগের অবস্থায় অতি সামান্যসংখ্যক অণুই থাকতে পারে। এই সূত্র অবলম্বন করে T_1 এবং T_2 এই দুটি বিভিন্ন তাপমাত্রার জন্য 1·2 চিত্রে বণ্টনের লেখদ্বয় আঁকা

হয়েছে, এক্ষেত্রে $T_2 > T_1$, উভয় লেখর মধ্যেই একটি চরম বিন্দু দেখতে পাওয়া যায় যা সবচেয়ে সম্ভাব্য বেগ নির্দেশ করে। সবচেয়ে সম্ভাব্য বেগ তাপমাত্রা এবং অণুগুলির ভরের উপর নির্ভরশীল। 1·5 সূত্রের সাহায্যে দেখান যায় যে, এই বেগের পরিমাণ নিম্নলিখিত সূত্রের দ্বারা প্রকাশিত

$$\text{সবচেয়ে সম্ভাব্য বেগ} = \sqrt{\frac{2kT}{M}}$$

$$\text{সবচেয়ে সম্ভাব্য শক্তি} = kT \qquad \cdots \qquad \cdots \quad 1·6$$

1·2 সূত্রের সঙ্গে তুলনা করলে দেখা যায় যে সবচেয়ে সম্ভাব্য শক্তির পরিমাণ গড় শক্তির পরিমাণের তুলনায় কম। লেখ দুটির প্রকৃতি থেকে কিংবা 1·5 সূত্রটি থেকে দেখা যায় যে বেগ কিছু সংখ্যক অণু থাকে যাদের বেগ সবচেয়ে সম্ভাব্য বেগের তুলনায় যথেষ্ট কম বা বেশী। ম্যাকস্ওয়েলের বেগ বণ্টন সূত্র পদার্থবিদ্যার একটি অত্যন্ত গুরুত্বপূর্ণ সূত্র, পরীক্ষাগারে নানা পরীক্ষার দ্বারা এই বণ্টন সূত্রের যথার্থতা অত্যন্ত নির্ভুলভাবে প্রমাণ করা সম্ভব হয়েছে।

প্রশ্নমালা

(1) ধর, এক সেণ্টিমিটার পার্শ্ব-সমন্বিত চৌপলের (cube) মধ্যে অক্সিজেনের অণুগুলি ইতস্ততঃ ভ্রমণ করছে। প্রতিটি অণুর ভর 53×10^{-24} গ্রাম এবং গতিবেগ 400 মি/সেক, প্রতি সেমি^{3} এর ভিতর পরমাণু সংখ্যা $2·7 \times 10^{19}$। প্রতিটি অণুই অপরিবর্তিত গতিবেগ নিয়ে ধাক্কা খেয়ে ফিরে আসে এমন ধরে নিয়ে এরা দেওয়ালের উপর কতটা চাপ সৃষ্টি করে নির্ণয় কর। [$0·763 \times 10^6$ ডাইন/সেমি^{2}]

(2) 0°C তাপমাত্রায় হাইড্রোজেনের বর্গমূল গড় বর্গ-গতিবেগ 1839 মি/সেক, একই তাপমাত্রায় অক্সিজেনের ঐ গতিবেগ কত হবে? এদের আণবিক ওজন হ'ল যথাক্রমে 2·016 এবং 32·000. [461 মি/সেক]

(3) 27°C তাপমাত্রায় একটি গ্যাসের অণুগুলির সরণ-গতি-জনিত গতিশক্তি কত হবে? [$6·21 \times 10^{-14}$ আর্গ]

(4) কোন ইলেকট্রোলাইট দ্রবণের ভিতর দিয়ে 96,500 কুলম্ব বিদ্যুৎ চালনা করলে তার ফলে 1 গ্রাম অণু (107·9 গ্রাম) রূপার অধঃক্ষেপ হয়; একটি রূপার অণুর ভর কত?

দ্বিতীয় অধ্যায়

পরমাণুর প্রকৃতি

গত শতাব্দীর শেষদিকে অবিসংবাদিতভাবে প্রমাণিত হয় যে জগতে পরমাণুর চেয়েও ক্ষুদ্রতর কতগুলি কণার অস্তিত্ব আছে। এই সব কণাগুলি সাধারণতঃ পরমাণুর ভিতরেই অবস্থান করে এবং পরমাণুর গঠনে এরাই মুখ্য ভূমিকা গ্রহণ করে থাকে। এইসব কণাগুলির মধ্যে সবার আগে আবিষ্কৃত হয় ইলেকট্রন। ইলেকট্রন একটি অতিশয় ক্ষুদ্র এবং হাল্কা বস্তু, ইলেকট্রনকে জগতের সবচেয়ে ক্ষুদ্র বস্তু বলা যায়, এর ওজন হ'ল এক অস্বাভাবিক ক্ষুদ্র পরিমাণ, $9{\cdot}10\times10^{-28}$ গ্রাম। এইরকমই আরেকটি কণা হ'ল প্রোটন, যার ওজন ইলেকট্রনের ওজনের প্রায় 1836 গুণ বেশী। এই কণাদ্বয়ের বৈশিষ্ট্য হ'ল যে এরা উভয়েই আহিত। প্রোটন ধন এবং ইলেকট্রন ঋণ আধানযুক্ত কিন্তু পরিমাণে উভয়ের আধান একেবারে সমান। প্রোটনের আধানকে "$+e$" এবং ইলেকট্রনের আধানকে "$-e$" রূপে চিহ্নিত করা হয়। পরীক্ষাগারে "e" এর পরিমাণ মাপা সম্ভব এবং সেই পরীক্ষাটির বিস্তৃত আলোচনা করা হবে। পরমাণুর ভিতরে যে ইলেকট্রন এবং প্রোটন উভয়ই অবস্থান করে তা গত শতাব্দীর অনেক বিজ্ঞানীই বিশ্বাস করতেন কিন্তু পরমাণুর প্রকৃত গঠন কি এবং কিভাবে ইলেকট্রন ও প্রোটন পরস্পরের পাশাপাশি অবস্থান করতে পারে তার সদুত্তর তাঁরা দিতে পারেন নি। পরমাণুর গঠন-প্রকৃতি সম্বন্ধে সর্ব্বপ্রথম একটি প্রকল্প উত্থাপন করেন জে. জে. টমসন (J. J. Thomson); এই প্রকল্প অনুযায়ী পরমাণুর গঠন অনেকটা একটা কাদার তালের মতো যার ভিতর ধন আধানের ঘনত্ব সর্ব্বত্র সমান; ইলেকট্রনগুলি এই তালের ভিতর ইতস্ততঃ নিহিত থাকে। এই প্রস্তাবের বিপরীতধর্ম্মী আরেকটি প্রস্তাব উত্থাপন করেন জাপানী বিজ্ঞানী নাগাওকা (Nagaoka)। তাঁর মতে ধন-আধান-বিশিষ্ট পারমাণবিক পদার্থ পরমাণুর ভিতর একটি অতি ক্ষুদ্র অঞ্চলে (কেন্দ্রীন) সীমাবদ্ধ থাকে, পরমাণুর ভিতর শূন্যদেশের অস্তিত্ব আছে এবং ধন-আহিত কেন্দ্রীনের চারপাশে আবর্তনশীল অবস্থায় ইলেকট্রনগুলি এই শূন্যদেশে অবস্থান করে। প্রথমে এই প্রস্তাব অবশ্য কোন পরীক্ষালব্ধ ফলাফলদ্বারা সমর্থিত ছিল না, কিন্তু পরবর্ত্তী-কালে রাদারফোর্ড (Rutherford) পরমাণুর গঠন-প্রকৃতির উপর অনেক

পরীক্ষা-নিরীক্ষা করে নাগাওকা প্রস্তাবিত উপরোক্ত গঠনপ্রকৃতির যথার্থতা নিশ্চিতভাবে প্রমাণ করেন। পরবর্ত্তী একটি অধ্যায়ে আমরা রাদারফোর্ডের এই পরীক্ষাটির বিষয় বিস্তৃত আলোচনা করব। নানাবিধ পরীক্ষা-নিরীক্ষার প্রাপ্ত পরমাণুর যে গঠনপ্রকৃতি বর্তমানে সর্ব্বজনস্বীকৃত তা হ'ল মোটামুটি এই: পরমাণুর ভিতর কেন্দ্রীন নামে একটি অতিক্ষুদ্র ধন-আহিত অঞ্চলের অস্তিত্ব আছে যার ভিতর পরমাণুর প্রায় সমস্ত ভর কেন্দ্রীভূত, কেন্দ্রীনের ভিতর এক বা একাধিক প্রোটনের অস্তিত্ব থাকতে পারে এবং কেন্দ্রীনের মোট আধান হ'ল এই প্রোটনগুলির আধানের যোগফল। পরমাণুর তুলনায় কেন্দ্রীনের আয়তন অতিশয় ক্ষুদ্র, পরমাণুর ব্যাসার্দ্ধ যেখানে প্রায় 10^{-8} সেমি সেখানে কেন্দ্রীনের ব্যাসার্দ্ধ $10^{-12} \sim 10^{-13}$ সেমি, এথেকেই কেন্দ্রীনের ক্ষুদ্রতা প্রতিপন্ন হয়। কেন্দ্রীন ছাড়া পরমাণুর বাকী অঞ্চল সমস্তই প্রায় শূন্যদেশ এবং ইলেকট্রনগুলি কেন্দ্রীনের বাইরে বহুদূরে এই শূন্যদেশে অবস্থান করে এবং ধন-আধানের আকর্ষণে কেন্দ্রীনের চারপাশে নির্দিষ্ট কক্ষপথে আবর্ত্তিত হয়, অনেকটা সূর্য্যের চারপাশে পৃথিবীর বার্ষিক আবর্ত্তনের মতো। সবচেয়ে সরল হ'ল হাইড্রোজেনের পরমাণু যার কেন্দ্রীনে শুধু একটিমাত্র প্রোটন এবং বহিঃস্থ কক্ষে একটিমাত্র ইলেকট্রন থাকে। অন্যান্য জটিলতর পরমাণুর কেন্দ্রীনে অধিকতর সংখ্যক প্রোটন এবং কক্ষগুলিতে সমসংখ্যক ইলেকট্রন থাকে। কেন্দ্রীনের আকর্ষণে ইলেকট্রনগুলি পরমাণুর ভিতর আবদ্ধ থাকে কিন্তু যথোচিত বহিঃশক্তির প্রভাবে এগুলিকে পরমাণুর ভিতর থেকে বিচ্ছিন্ন করে ফেলা যায়। পদার্থকে খুব উচ্চ তাপমাত্রায় উত্তপ্ত করলে কিংবা এর-উপর খুব স্বল্প তরঙ্গ-দৈর্ঘ্যের রশ্মি ফেললে পরমাণুগুলির ভিতর ইলেকট্রনগুলি উত্তেজিত হয়ে ওঠে এবং তখন এরা পরমাণুর ভিতর থেকে কখনো কখনো বিচ্ছিন্নও হয়ে যেতে পারে। এইভাবে আধানশূন্য পরমাণুর ভিতর থেকে একটি ইলেকট্রন বেরিয়ে এলে পরমাণুটি একটি ধন-আহিত কণার মতো ব্যবহার করবে, ঐ অবস্থায় পরমাণুটিকে বলা হয় আয়ন। সাধারণতঃ একটি আয়ন কিছুক্ষণ পর আবার একটি ইলেকট্রনকে আবদ্ধ করে আধানবিহীন পরমাণুতে পরিণত হয়। খুব উচ্চশক্তি-বিশিষ্ট একটি আহিত-কণা যখন কোন গ্যাসের ভিতর দিয়ে বেরিয়ে যায়, তখন এর সঙ্গে সংঘর্ষের ফলে গ্যাসের পরমাণুগুলির ভিতর থেকে ক্রমাগত ইলেকট্রন বেরিয়ে আসতে থাকে এবং এইভাবে দ্রুত বহু আয়নের সৃষ্টি হয়। এই প্রক্রিয়ায় সূর্য্য অথবা মহাকাশ থেকে আগত শক্তিশালী কণা এবং বিকিরণের প্রভাবে বায়ুমণ্ডলে সবসময়ই কিছু আয়নের সৃষ্টি হয়ে থাকে।

ইলেকট্রনের উৎস

জগতে যদিও ইলেকট্রনের অস্তিত্ব সর্ববব্যাপী কিন্তু পরমাণুর ভিতর আবদ্ধ থাকে বলে মুক্ত অবস্থায় একে পাওয়া দুরূহ। প্রকৃতির ভিতর নানা-রকম প্রক্রিয়ায় কদাচিৎ মুক্ত ইলেকট্রন সৃষ্টি হলেও এদের মুক্ত অবস্থার আয়ু খুবই অল্প এবং ঐ অল্প সময়ের মধ্যে এদের উপর বৈজ্ঞানিক পর্য্যবেক্ষণ করা বেশ কঠিন। পরীক্ষাগারে ইলেকট্রন পর্য্যবেক্ষণের প্রাচীনতম পদ্ধতি হ'ল গ্যাসের ভিতর বিদ্যুৎমোক্ষণ প্রক্রিয়া (electric discharge in gases)। সাধারণতঃ একটি কাঁচপাত্রে কোন গ্যাস রেখে এর ভিতর দু'ধারে দুটি বিদ্যুৎধারক (electrode) বসান হয় এবং এদের ভিতর অত্যন্ত উচ্চ পরিমাণের বিভব-ব্যবধান সৃষ্টি করা হয়। পরে পাম্পের দ্বারা পাত্রটিকে ক্রমশঃ গ্যাসশূন্য করে ফেলা হতে থাকে। যখন নলের ভিতর গ্যাসের চাপ খুবই কমে যায় তখন উচ্চবিভবের প্রভাবে অভ্যন্তরস্থ গ্যাসের অণুগুলি উত্তেজিত হয়ে আলো বিকিরণ করতে থাকে। এই বিকিরণ ঘটে নিম্নলিখিত উপায়ে : প্রথমতঃ তীব্র বিভব-ব্যবধানের প্রভাবে নলের অভ্যন্তরে গ্যাসের কিছু অণু আয়নে পরিণত হয়, তারপর বৈদ্যুতিক ক্ষেত্রের দ্বারা আকৃষ্ট হয়ে ঋণ-আহিত কণাগুলি ধন-বিদ্যুৎধারকের দিকে এবং ধন-আহিত আয়নগুলি ঋণ-বিদ্যুৎধারকের দিকে ধাবিত হয়, এই সময় আহিত কণাগুলি ত্বরিত ও শক্তিপ্রাপ্ত হয়। এই শক্তিশালী কণা বা আয়নগুলি গ্যাসের অন্যান্য অণুর সঙ্গে ধাক্কা লাগিয়ে ঐগুলিকে উত্তেজিত অণুতে বা আয়নে পরিণত করে। আয়নগুলি যখন পুনরায় মুক্ত ইলেকট্রনের সঙ্গে মিলিত হয়ে অণু বা পরমাণুতে পরিণত হয় অথবা যখন উত্তেজিত অণু ও পরমাণুগুলি স্বাভাবিক অবস্থায় ফিরে আসে সেই সময় এরা আলোকশক্তি বিকিরণ করে, এইভাবেই বিদ্যুৎমোক্ষণের দ্বারা আলোর সৃষ্টি হয়।

কিন্তু যখন নলের ভিতর চাপের পরিমাণ কমিয়ে কমিয়ে প্রায় 0·001 মিলিমিটার পারদের চাপের সমান করা হয় তখন আর এর ভিতর থেকে কোন আলো নির্গত হয় না। এর কারণ ঐ স্বল্পপরিমাণ চাপে গ্যাসের ঘনত্ব এত কমে যায় যে তখন আয়নগুলি সরাসরি বিদ্যুৎধারকের উপর গিয়ে আঘাত করতে থাকে, গ্যাসের অণুর সঙ্গে সংঘর্ষ ঘটাবার আর সুযোগ পায় না। আয়নগুলি যখন ঋণ-বিদ্যুৎধারকের উপর গিয়ে পড়ে তখন ঐ বিদ্যুৎধারকের ভিতর থেকে ইলেকট্রন বেরিয়ে আসে। এই ইলেকট্রনগুলি বিদ্যুৎধারকের গা-থেকে লম্বভাবে উৎপন্ন হয়ে বৈদ্যুতিক ক্ষেত্রের প্রভাবে সোজা ধন-বিদ্যুৎ-ধারকের উপর গিয়ে পড়ে, এই প্রবাহকে বলা হয় ঋণ-বিদ্যুৎধারক-রশ্মি

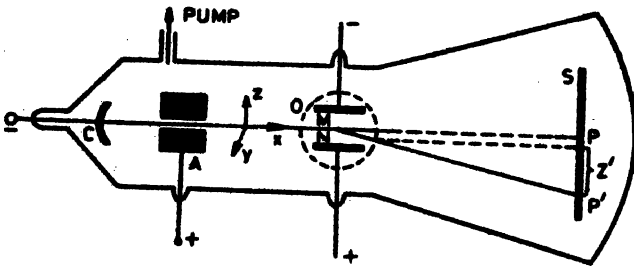
(cathode rays)। বিজ্ঞানী জে. জে. টমসনই প্রথম ঋণ-বিদ্যুৎধারক রশ্মি নিয়ে গবেষণা করে এই রশ্মির অভ্যন্তরস্থ কণাগুলির আধান ও ভরের অনুপাত, e/m, নির্ণয় করেন। টমসনের পরীক্ষা আধুনিক পদার্থবিজ্ঞানের একটি অন্যতম উল্লেখযোগ্য পরীক্ষা এবং ঐটি আমরা সবিস্তারে বর্ণনা করব।

একই প্রকার আয়োজনের দ্বারা শক্তিশালী ধন-আহিত আয়নের প্রবাহও উৎপন্ন করা যায়। ধন-বিদ্যুৎধারকের দ্বারা বিকর্ষিত হয়ে যে ধন-আহিত আয়নগুলি ঋণ-বিদ্যুৎধারকের উপর এসে পড়ে সেগুলিকে ঐ বিদ্যুৎধারকের মধ্যস্থ একটি ছিদ্রের ভিতর দিয়ে বাইরে বের করে নিয়ে আসা হয় [2·3(b) চিত্র দ্রষ্টব্য]। এইভাবে উৎপন্ন ধন-আহিত আয়নের ধারার উপর বৈদ্যুতিক এবং চৌম্বক ক্ষেত্র প্রয়োগ করে এদের ভর মাপা যায়।

ইলেকট্রন পর্য্যবেক্ষণের অন্যান্য পদ্ধতিগুলির মধ্যে উল্লেখযোগ্য হ'ল তাপীয় বিদ্যুৎমোক্ষণ-প্রক্রিয়া (Thermionic emission)। কিছু পদার্থ আছে যেগুলিকে খুব বেশী তাপমাত্রায় উত্তপ্ত করলে তাদের ভিতর থেকে প্রচুর পরিমাণে ইলেকট্রন নির্গত হতে থাকে। এই তাপীয় বিদ্যুৎমোক্ষণ-জনিত ইলেকট্রনগুলির e/m পরিমাপ করে দেখা গেছে যে এরা এবং গ্যাসের ভিতর বিদ্যুৎমোক্ষণ থেকে উদ্ভূত কণাগুলি পরস্পর অভিন্ন। কোন কোন পদার্থ আছে যাদের ভিতর আলো পড়লে ইলেকট্রন উৎপন্ন হয়, এই প্রক্রিয়াটিকে বলা হয় আলোকবিদ্যুৎ প্রক্রিয়া। এই প্রক্রিয়ার দ্বারাও ইলেকট্রন উৎপন্ন করে সহজে এর ধর্ম্মাবলী পর্য্যবেক্ষণ করা যায়, এই প্রক্রিয়াটি সম্বন্ধে আমরা পরে বিশদভাবে আলোচনা করব।

ইলেকট্রনের আধান ও ভরের অনুপাত

ঋণ-বিদ্যুৎধারকের ভিতর থেকে যে ইলেকট্রনগুলি বেরিয়ে আসে তাদের আধান ও ভরের অনুপাত প্রথম নির্ণয় করেন জে. জে. টমসন (J. J. Thomson), পরে মিলিকান (Millikan) অপর একটি পৃথক পরীক্ষায় ইলেকট্রনের আধান সরাসরি মাপতে সক্ষম হন। এইভাবে ইলেকট্রনের আধান ও ভর দুইই জানা সম্ভব হয়। জে. জে. টমসনের পরীক্ষার মূল নীতি হ'ল ইলেকট্রনগুলিকে নির্দ্দিষ্ট এবং ধ্রুব পরিমাণের বৈদ্যুতিক ক্ষেত্রের ভিতর দিয়ে চালনা করে এদের গতিপথের কতটা বিচ্যুতি ঘটে তা লক্ষ্য করা। পরীক্ষার আয়োজনের মধ্যে কণাগুলির গতিপথে বৈদ্যুতিক এবং চৌম্বক ক্ষেত্র পরস্পর লম্বভাবে অবস্থান করে এবং এদের দ্বারা যে বিচ্যুতি ঘটে তা হয়

উভয় ক্ষেত্রেই একই দিকে, নতুবা পরস্পরের বিপরীত দিকে ঘটে থাকে। এই পরীক্ষায় অজ্ঞাত রাশিগুলি হ'ল ইলেকট্রনের e/m অনুপাত এবং এর গতিবেগ v। উপরোক্ত দুই ধরণের বিচ্যুতির পরিমাণ জেনে দুটি সমীকরণ তৈরী করা যায় যাথেকে v এবং e/m উভয়েরই পরিমাণ নির্ণয় করা সম্ভব। 2·1 চিত্রে পরীক্ষাটি বিশদভাবে বর্ণনা করা হয়েছে। ঋণ-বিদ্যুৎধারক (negative electrode) C-এর ভিতর থেকে লম্বভাবে উৎপন্ন হয়ে ইলেকট্রনগুলি ধন-বিদ্যুৎধারক A-এর উপর একটি সরলরেখায় এসে পড়ে। A-এর ভিতর একটি ছিদ্র থাকে যার মধ্য দিয়ে প্রবহমান ইলেকট্রনের ধারা বেরিয়ে এসে X-দিক বরাবর চলতে থাকে এবং পরিশেষে S পর্দার উপর গিয়ে পড়ে। মাঝখানে M ও N হ'ল দুটি সমান্তরাল ধাতুর পাত যাদের ভিতর ধ্রুব বিভব-ব্যবধান সৃষ্টি করে রাখা হয়। 2·1 চিত্রে এই পাত দুইটির ভিতর দিয়ে যাবার সময় ইলেকট্রনগুলি বৈদ্যুতিক আকর্ষণের প্রভাবে

চিত্র 2·1

ইলেকট্রনের e/m অনুপাত নির্ণয়ের জন্য জে. জে. টমসনের পরীক্ষার আয়োজন।

$-Z$ দিকে বিচ্যুত হয়। আবার O বৃত্তটি এঁকে বোঝান হয়েছে চুম্বকের পাশাপাশি অবস্থিত দুটি বিপরীত মেরু যাদের ভিতর তীব্র চৌম্বক ক্ষেত্র বর্তমান আছে। চুম্বকের ধন ও ঋণ মেরুর অবস্থান এইরকম থাকে যে চৌম্বকক্ষেত্রের প্রভাবে ইলেকট্রনগুলি $+Z$ দিকে বিচ্যুত হয়। S পর্দাটি দীপনশীল (fluorescent) পদার্থে গঠিত অর্থাৎ ইলেকট্রনের ধারা S-এর উপর এসে আঘাত করলে আলোক বিকিরণ হতে থাকে এবং তাথেকে ধারাটি কোথায় এসে আঘাত করছে বোঝা যায়। ফোটোগ্রাফীর প্লেট ব্যবহার করেও এই পরীক্ষাটি করা যায়। পর্দাটির গায়ে সাধারণতঃ দুটি মাপনী (scale) আঁকা থাকে যার সাহায্যে ধারাটি যে বিন্দুতে এসে আঘাত করছে তার y এবং z স্থানাঙ্ক সহজেই জানা যায়।

M এবং N পাত দুটির অভ্যন্তরদেশে বৈদ্যুতিক ক্ষেত্রের তীব্রতা (intensity) সর্বত্র সমান এবং এর পরিমাণ ধরা যাক E, $E = V/d$, V ও d যথাক্রমে বিদ্যুৎধারক পাত দুটির ভিতর বিভব-ব্যবধান ও লম্বদূরত্ব। এই ক্ষেত্রের দ্বারা আকর্ষিত একটি ইলেকট্রনের ত্বরণের পরিমাণ হবে

$$a = \frac{eE}{m} \qquad 2{\cdot}1$$

m এবং e যথাক্রমে ইলেকট্রনের ভর এবং আধান। পাত দুটির মধ্যে দিয়ে চলার সময় শুধুমাত্র বৈদ্যুতিক ক্ষেত্রের প্রভাবে $-Z$ দিকে মোট বিচ্যুতির পরিমাণকে যদি z ধরা হয় তবে

$$z = \tfrac{1}{2}at^2 \quad \cdots \quad \cdots \quad 2{\cdot}2$$

এখানে t হল বৈদ্যুতিক ক্ষেত্রের ভিতর ইলেকট্রনটির মোট অবস্থান কাল

$$t = \frac{L}{v} \qquad 2{\cdot}3$$

L, M পাতের দৈর্ঘ্য এবং v ইলেকট্রনের প্রাথমিক গতিবেগ। ছবিতে অক্ষগুলিকে এমনভাবে রাখা হয়েছে যাতে X-অক্ষটি ইলেকট্রনের প্রাথমিক গতিবেগের দিক বরাবর থাকে। প্রথমে শুধুমাত্র বৈদ্যুতিক ক্ষেত্রের দ্বারা ইলেকট্রনের কতটা বিচ্যুতি হ'ল তা লক্ষ্য করে পরে বৈদ্যুতিক ও চৌম্বক ক্ষেত্রদ্বয় একত্রে প্রয়োগ করা হয়। আগেই বলা হয়েছে যে, বৈদ্যুতিক ও চৌম্বক ক্ষেত্রদ্বয় এমনভাবে আয়োজিত থাকে যে এদের প্রভাবে বিচ্যুতি ঘটবে পরস্পরের বিপরীত দিকে ; ক্ষেত্রদ্বয়ের তীব্রতা এমনভাবে নির্দ্ধারিত হয় যাতে এদের যুগপৎ প্রয়োগের ফলে ইলেকট্রন ধারাটির কোন বিচ্যুতি ঘটে না অর্থাৎ ক্ষেত্রদ্বয় প্রয়োগের পূর্ব্বে ইলেকট্রন ধারাটি পর্দার উপর যেখানে এসে আঘাত করেছিল পরেও ঠিক সেইখানেই এসে আঘাত করে। এরকম পরিস্থিতিতে বৈদ্যুতিক এবং চৌম্বক বল পরস্পরের সমান কিন্তু বিপরীতমুখী হবে। গতিশীল ইলেকট্রনের উপর চৌম্বক বল সহজেই নির্দ্ধারণ করা যায় ; e পরিমাণ আধান যদি v গতিতে X দিকে চলতে থাকে তাহলে ev পরিমাণের বৈদ্যুতিক প্রবাহের সৃষ্টি হয় এবং যেহেতু এই প্রবাহ এবং চৌম্বক ক্ষেত্র পরস্পরের সঙ্গে লম্বভাবে আছে সুতরাং এই প্রবাহের উপর অর্থাৎ ইলেকট্রনের উপর মোট বলের পরিমাণ হবে

$$F = Bev/c \quad \cdots \quad \cdots \quad 2{\cdot}4$$

B এবং c যথাক্রমে চৌম্বক ক্ষেত্রের তীব্রতা এবং আলোর গতিবেগ।

এই সূত্রে ইলেকট্রনের আধান e স্থিরবৈদ্যুতিক এককে প্রকাশিত এবং চৌম্বক ক্ষেত্রের একক হল গস*।

যদি উপরোক্ত পরিস্থিতিতে ইলেকট্রন ধারাটির গতিপথের কোন পরিবর্তন না ঘটে তাহলে আমরা পাই

$$eE = \frac{Bev}{c}$$

$$v = \frac{Ec}{B} \qquad \cdots \qquad \cdots \qquad 2.5$$

2·1, 2·2 এবং 2·3 সম্বন্ধত্রয় ব্যবহার করে আমরা লিখতে পারি

$$\frac{e}{m} = \frac{a}{E} = \frac{2z}{t^2E} = \frac{2zv^2}{L^2E}$$

এবার উপরোক্ত v-এর পরিমাণ প্রয়োগ করলে আমরা পাই

$$\frac{e}{m} = \frac{2Ec^2}{L^2B^2z} \qquad \cdots \qquad \cdots \qquad 2.6$$

এই সমীকরণে ডানদিকের সবগুলি রাশিই পরীক্ষায় মাপা যায় এবং তাথেকে ইলেকট্রনের e/m মাপা সম্ভব। পরীক্ষার মূল পরিমাপ্য রাশিগুলি হ'ল E, B এবং z, পৃথক পৃথক পরীক্ষার দ্বারা এদের মান অতি নির্ভুলভাবে জানা দরকার। ইলেকট্রনের e/m অনুপাতের শুদ্ধ পরিমাণ হ'ল

$$e/m = (5.27305 \pm 0.00007) \times 10^{17} \text{ স্থিরবৈদ্যুতিক একক/গ্রাম}$$

z-এর পরিমাণ নির্দ্ধারণ করা হয় পর্দায় ইলেকট্রন ধারার মোট বিচ্যুতি PP′ লক্ষ্য করে। ঠিক যখন পাতদ্বয়ের ভিতর থেকে বেরিয়ে আসছে, সেই মুহূর্তে বৈদ্যুতিক ক্ষেত্রের প্রভাবে ইলেকট্রনের $-Z$ দিকে গতিবেগের পরিমাণ হবে

$$v_z = a\,t = \frac{eVL}{dmv}$$

ইলেকট্রনগুলির এই গতিবেগ থাকার জন্য D দূরত্ব (2·1 চিত্র) অতিক্রম করার জন্য $-Z$ দিকে এদের যে অতিরিক্ত বিচ্যুতি হবে তার পরিমাণ

$$z' = v_z t' = v_z \cdot \frac{D}{v} = \frac{eVLD}{dmv^2}$$

---

* এই পুস্তকের সর্বত্রই বিদ্যুৎ-চুম্বকীয় রাশিগুলি CGS গসীয় (Gaussian) এককে প্রকাশ করা হবে।

সুতরাং

$$PP' = z + z' = \frac{eVL^2}{2dmv^2} + \frac{eVLD}{dmv^2}$$

অর্থাৎ

$$\frac{z}{PP'} = \frac{\frac{1}{2}L}{\frac{1}{2}L + D}$$

এইভাবে PP′ এর পরিমাণ থেকে z এর পরিমাণ নির্দ্ধারণ করা যায়। এই পরীক্ষায় e এবং m এই রাশিদ্বয়ের অনুপাতই শুধু নির্ণয় করা সম্ভব, এককভাবে এদের প্রত্যেকের পরিমাণ এই ধরণের পরীক্ষায় নির্ণয় করা যায় না। বিভিন্ন ধরণের পরীক্ষায় প্রাপ্ত e/m-এর পরিমাণ বিচার করলে দেখা যায় যে এই অনুপাতের মান ধ্রুব নয়, ইলেকট্রনের গতিবেগের সঙ্গে সঙ্গে এই অনুপাতের মান বদলে যেতে থাকে, দেখা যায় যে গতিবেগের সাথে সাথে এই অনুপাতের পরিমাণ ক্রমশঃ হ্রাস পায়। এর কারণ হ'ল আপেক্ষিকতাতত্ত্ব অনুযায়ী গতিবেগের সাথে সাথে ভরের পরিমাণ ক্রমশঃ বৃদ্ধি পায়, এই বিষয়ে আমরা পরে আরও আলোচনা করব। উপরে ইলেকট্রনের e/m অনুপাতের যে পরিমাণ লেখা হয়েছে তা সম্পূর্ণ স্থির অবস্থার ভরকে নির্দেশ করে।

ডানিংটনের (Dunnington) পদ্ধতি

জে. জে. টমসনের পরীক্ষার পর আরও বহুসংখ্যক বিভিন্ন পরীক্ষায় $\frac{e}{m}$ অনুপাত মাপা হয়েছে, প্রত্যেকটি পরীক্ষারই মূল লক্ষ্য হ'ল এই অনুপাতের ক্রমশঃ শুদ্ধ থেকে শুদ্ধতর পরিমাণ নির্ণয় করা। এইসব পরিমাপগুলির মধ্যে ডানিংটনের (Dunnington) পদ্ধতিটি উল্লেখযোগ্য কারণ এই পদ্ধতিতে অত্যন্ত নির্ভুল e/m অনুপাত নির্ণয় করা সম্ভব। এই পদ্ধতির মূল সুবিধা হ'ল এই যে এক্ষেত্রে ত্বরকবিভবের পরিমাণ জানার কোন প্রয়োজন নেই। সংস্পর্শজাত অজ্ঞাত বিভবের উপস্থিতি হেতু অনেকসময় ত্বরকবিভবের নির্ভুল পরিমাণ নির্দ্ধারণ অত্যন্ত কঠিন হয়ে পড়ে, সুতরাং অজ্ঞাত রাশিগুলির মধ্য থেকে যদি এই ত্বিভবের পরিমাণ অপনয়ন করা যায় তবে পরিমাপটি নিঃসন্দেহে শুদ্ধতর হবে।

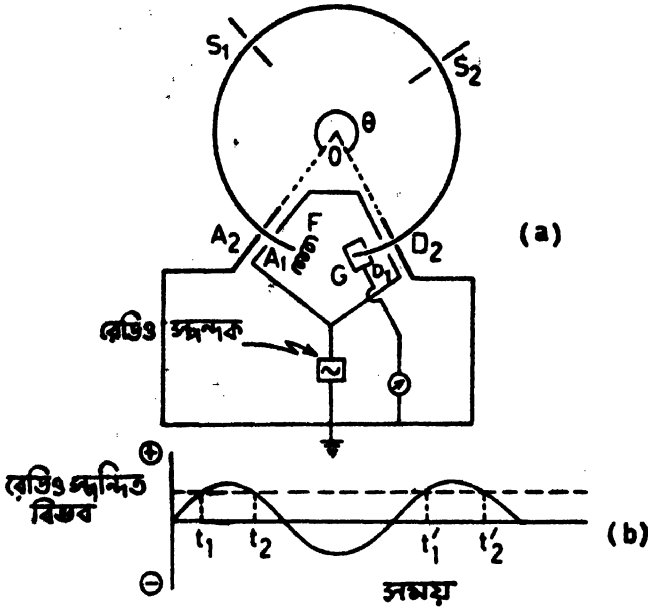
2·2 চিত্রে পরীক্ষার আয়োজন নির্দেশ করা হয়েছে। একটি বৃহৎ বায়ুমুক্ত আধারের অভ্যন্তরে একটি বৃত্তের পরিধি বরাবর কতকগুলি ফাঁক সজ্জিত রয়েছে যেগুলির দ্বারা ইলেকট্রনের গতিপথ নিয়ন্ত্রণ করা হয়। চিত্রে এই

ফাঁকগুলির অবস্থিতি যথাক্রমে A_1 A_2, S_1 S_2 এবং D_1 D_2 অক্ষরগুলির দ্বারা নির্দেশিত হয়েছে। এই বৃহৎ কক্ষটির অভ্যন্তরভাগে রয়েছে অপেক্ষাকৃত ক্ষুদ্র একটি কক্ষ যেটি আবার একটি পার্টিশন দ্বারা দুটি প্রকোষ্ঠে বিভক্ত থাকে। একটি প্রকোষ্ঠের মধ্যে রয়েছে একটি ফিলামেন্ট F, অপরটিতে রয়েছে একটি ইলেকট্রন আহরক G অর্থাৎ সিলিণ্ডার আকৃতির একটি ধাতুর আধার যেটির মধ্যে ইলেকট্রনগুলি সংগৃহীত হয়, একে বলা হয় ফ্যারাডে বৈদ্যুতিক খাঁচা। ধাতুর আবরণীর দ্বারা বেষ্টিত বলে F এবং G রেডিও স্পন্দিত ক্ষেত্রের প্রভাব থেকে মুক্ত থাকে। রেডিও স্পন্দিত বিভব A_1 ও A_2 এবং D_1 ও D_2এর মধ্যে সংযুক্ত যেমন চিত্রে দেখান হয়েছে। ইলেকট্রন সংগ্রাহক G একটি ইলেকট্রোমিটারের সঙ্গে যুক্ত। ধ্রুব এবং সমমাত্র চৌম্বকক্ষেত্র সৃষ্টির জন্য একজোড়া হেলম্‌হোলটজ্‌ কুণ্ডলী O বিন্দুর ভিতর দিয়ে অবস্থিত একটি অক্ষের সঙ্গে লম্বভাবে বৃত্তাকার কক্ষপথটির দুপাশে বসান হয়। চিত্রে তীরচিহ্নিত রেখার সাহায্যে ইলেকট্রনের গতিপথ দেখান হয়েছে, চৌম্বকক্ষেত্রটি এই গতিপথের সঙ্গে লম্বভাবে অবস্থান করে।

ফিলামেন্ট F থেকে নির্গত ইলেকট্রনগুলি প্রথমে A_1 এবং A_2 এর মধ্যবর্তী ফাঁকের ভিতর দিয়ে ত্বরিত হয়। এই ত্বরণ একমাত্র ঘটতে পারে বিভবস্পন্দনের প্রথম অর্দ্ধচক্রে যখন A_2, A_1 এর তুলনায় ধনআহিত থাকে। এইসব ত্বরিত ইলেকট্রনগুলির শূন্য থেকে আরম্ভ করে চরম ত্বরক বিভবের সঙ্গে সঙ্গতিপূর্ণ এক চরম পরিমাণের গতিবেগ থাকতে পারে। চৌম্বকক্ষেত্রের কোন নির্দিষ্ট তীব্রতার জন্য শুধু সেইসব ইলেকট্রনগুলিই S_1, S_2 ইত্যাদি ফাঁকগুলি অতিক্রম করতে পারে যাদের গতিবেগ v নিম্নলিখিত সমীকরণ দ্বারা প্রদত্ত

$$\frac{Bev}{c}=\frac{mv^2}{R} \quad \ldots \quad \ldots \quad 2.7$$

এখানে R, ফাঁকগুলির দ্বারা নির্দেশিত O-কেন্দ্রীয় বৃত্তটির ব্যাসার্দ্ধ। যেসব ইলেকট্রনগুলির গতি এই সর্ত্তটি মেনে চলে সেগুলি D_2 ফাঁকটির মধ্যে প্রবেশ করবে। সেখানে এরা ত্বরণ অথবা প্রতিত্বরণ অনুভব করবে তা নির্ভর করে ঐখানে সেসময় ত্বরকবিভব কি দশায় আছে তার উপর। A_2 এবং D_2 এর বিভব সবসময়ই একই দশায় থাকে। ধ্রুব স্পন্দনাংকের বিভব ব্যবধান প্রয়োগ করে চৌম্বকক্ষেত্র B এর সেই নির্দিষ্ট পরিমাণ B_r নির্দ্ধারণ করা যায় এমনভাবে যাতে ইলেকট্রনের A_2 থেকে D_2 পর্য্যন্ত বৃত্তের চাপ অতিক্রম করতে ঠিক স্পন্দনের এক সময়-

অন্তর (অথবা এর কোন পূর্ণসংখ্যক গুণিতক) অতিবাহিত হয়। এই অবস্থায় ইলেকট্রনগুলি A_1 A_2 এর মধ্যে যে বিভব ব্যবধানের দ্বারা ত্বরিত হয়েছিল ঠিক সেই বিভব ব্যবধানের দ্বারাই D_2D_1 মধ্যে প্রতিত্বরিত হয়। ধরা যাক A_1 ও A_2 এর মধ্যে তাৎক্ষণিক ত্বরক বিভব ইলেকট্রনগুলির মধ্যে এমন গতিবেগ সঞ্চার করতে পারে যার ফলে B এর B_f পরিমাণ নিয়ে 2·7 সর্তটি পালিত হতে পারে এবং ইলেকট্রনগুলি বিভবস্পন্দনের ঠিক এক সময়অন্তর পর D_2 ফাঁকের মধ্যে উপস্থিত হয়। একটি স্পন্দনচক্রের মধ্যেই এই ত্বরণক্রিয়াটি ঘটে, ধরা যাক এই ত্বরণ ঘটে t_1 ও t_2 সময়ের মধ্যে [2·2 (b) চিত্র]। ঠিক এক সময়অন্তর পর এই ইলেকট্রনগুলিই D_2D_1 পাতদ্বয়ের মধ্যে সম্পূর্ণ প্রতিত্বরিত হয়ে যাবে যথাক্রমে t_1' ও t_2' সময়ের মধ্যে।

চিত্র 2·2
শুদ্ধতর e/m মান নির্ণয়ের জন্ম ডানিংটনের পরীক্ষার বিবরণ।

যদি উপযুক্ত পরিমাণের প্রতিত্বরণ ঘটে তাহলে ইলেকট্রনগুলির গতি এতই হ্রাস পাবে যে এগুলি আর ইলেকট্রন সংগ্রাহকের ভিতর পৌঁছাতে পারবে না। B_f ভিন্ন অপর কোন চৌম্বকক্ষেত্রের তীব্রতায় প্রতিত্বরণ হবে পূর্ববর্তন ত্বরণের তুলনায় অনেক কম এবং ইলেকট্রনগুলি তখন সংগ্রাহকের মধ্যে এসে উপস্থিত হবে। সংগ্রাহকের সঙ্গে একটি ইলেকট্রোমিটার যুক্ত আছে, সেটির ভিতর দিয়ে বিদ্যুৎপ্রবাহ লক্ষ্য করে কি হারে ইলেকট্রনগুলি এসে সংগৃহীত হচ্ছে তা বোঝা যায়।

পরীক্ষার দ্বারা তীব্রতা B বনাম সংগ্রাহকের বিদ্যুৎপ্রবাহের পরিমাণের একটি লেখ আঁকা হয়। এথেকে সংকট তীব্রতা B_f নির্দ্ধারিত হয় যখন বিদ্যুৎপ্রবাহের পরিমাণ হয় ন্যূনতম। এই অবস্থায় ইলেকট্রনগুলির গতিবেগ হ'ল

$$v_f = \frac{R\theta}{nT} \qquad \cdots \qquad \cdots \qquad 2.8$$

$$n = 1, 2, 3 \ldots\ldots$$

A_2 এবং B_2 এর মধ্যে বৃত্তাকার ইলেকট্রনের গতিপথ কেন্দ্রে θ কোণ উৎপন্ন করে এবং T হ'ল বিভব স্পন্দনের সময়অন্তর। এবার 2.7 সমীকরণ থেকে যখন বিদ্যুৎপ্রবাহের পরিমাণ ন্যূনতম

$$\frac{B_f e v_f}{c} = \frac{m v_f^2}{R}$$

$$\frac{e}{mc} = \frac{v_f}{B_f R}$$

v_f এর পূর্বোক্ত পরিমাণ বসালে (2.8) আমরা পাই

$$\frac{e}{mc} = \frac{\theta}{nTB_f} \qquad \cdots \qquad \cdots \qquad 2.9$$

ডানিংটনের পরীক্ষায় যে শুদ্ধতর ফল পাওয়া যায় তার পরিমাণ হ'ল

$$\frac{e}{m} = (1.7597 \pm 0.0015) \times 10^7 \text{ বিদ্যুৎচুম্বকীয় একক/গ্রাম}$$

এই পরীক্ষায় রেডিওস্পন্দিত ক্ষেত্রের স্পন্দনাঙ্ক অত্যন্ত নির্ভুলভাবে পরিমাপ করা সম্ভব, ভুলের পরিমাণ হয় 10^6 ভাগের একভাগ মাত্র। এছাড়া θ কোণটিও খুবই নির্ভুলভাবে মাপা সম্ভব। শেষ পর্যন্ত শুদ্ধতা নির্ভর করে কতটা নির্ভুলভাবে চৌম্বকক্ষেত্রের সমমাত্রতা বজায় রাখা যায় এবং কতটা নির্ভুলভাবে ঐ ক্ষেত্রের তীব্রতা পরিমাপ করা যায় তার উপর।

ধনআহিত আয়নের ভর

ইলেকট্রনের e/m এর পরিমাণ সাফল্যজনকভাবে মাপা সম্ভব হলে পর চেষ্টা শুরু হ'ল বিভিন্ন আয়নের e/m অনুপাত মাপার। আগেই বলা হয়েছে যে, পরমাণুর ভিতর থেকে এক বা একাধিক ইলেকট্রন বেরিয়ে গেলে একটি ধনআহিত আয়ন সৃষ্টি হয় এজন্য যাবতীয় আয়নের আধানের পরিমাণ হয় পরস্পর সমান নতুবা একে অন্যের পূর্ণসংখ্যক গুণিতক (integral multiple)। মিলিকানের পরীক্ষা যা আমরা পরবর্তী একটি পরিচ্ছেদে বর্ণনা করব তাথেকে ইলেকট্রনের আধান অতিশয় শুদ্ধভাবে নির্ণীত হবার পর এইসব পরীক্ষাগুলির মূল লক্ষ্য হয়ে পড়ল আয়নের ভরের পরিমাণ M নির্দ্ধারণ

করা। ধনআহিত আয়নগুলির ভরের পরিমাণ নির্ণয়ের প্রথম প্রচেষ্টাও বিজ্ঞানী জে. জে. টমসনের, এই প্রচেষ্টার ফলে আবিষ্কৃত হয় পারমাণবিক জগতের এক অভিনব বস্তু, আইসোটোপ। পরমাণুসংক্রান্ত গবেষণার প্রথম দিকে প্রতিটি বিভিন্ন মৌলের পরমাণু শুধু তাদের বিশেষ ধরণের রাসায়নিক গুণাবলী এবং পারমাণবিক ওজন দ্বারা বিশেষিত হ'ত। টমসনের পরীক্ষা থেকে জানা গেল যে একই মৌলের পরমাণু বিভিন্ন ভরবিশিষ্ট প্রকারভেদে জগতে অবস্থান করতে পারে। ঐ বিভিন্ন প্রকারের পরমাণুগুলির রাসায়নিক গুণাবলী অভিন্ন শুধু এদের পরস্পরের ভর পৃথক। এদেরই বলা হয় আইসোটোপ, টমসনের পরীক্ষায় এদের অস্তিত্ব প্রথম ধরা পড়ে।

ধনআহিত আয়নের ভর নির্ণয়ের পদ্ধতি ইলেকট্রনের e/m নির্ণয়ের পদ্ধতির অনুরূপ তবে সামান্য পার্থক্য আছে। এই পরীক্ষায় একটি আয়নের ধারাকে পরস্পর সমান্তরাল বৈদ্যুতিক ও চৌম্বকক্ষেত্রের মধ্য দিয়ে চালিত করা হয় এবং বিচ্যুত আয়নগুলি অবশেষে একটি পর্দার উপর এসে পড়ে [চিত্র 2·3(a)]। স্মরণীয় যে ইলেকট্রনের ক্ষেত্রে ধারাটিকে পরস্পর উল্লম্ব বৈদ্যুতিক ও চৌম্বকক্ষেত্রের ভিতর দিয়ে চালিত করা হয়েছিল কিন্তু যেহেতু বর্তমান ক্ষেত্রে ক্ষেত্রদ্বয় পরস্পর সমান্তরাল এজন্য এখন এদের প্রভাবে বিচ্যুতিগুলি একে অন্যের সঙ্গে লম্বভাবে ঘটবে। অর্থাৎ বৈদ্যুতিক ক্ষেত্রের জন্য ত্বরণ যদি y-দিকে হয়, তবে চৌম্বকক্ষেত্রের জন্য ত্বরণ হবে z-দিকে [চিত্র 2·3(a)]। যে অঞ্চলে ধ্রুব সমমাত্র বৈদ্যুতিক ও চৌম্বকক্ষেত্রের অস্তিত্ব আছে তার মোট দৈর্ঘ্য L এবং আয়নগুলির x-দিকে প্রাথমিক গতিবেগের পরিমাণ v_x, সুতরাং L দূরত্ব অতিক্রম করার পর বৈদ্যুতিক ক্ষেত্রে ত্বরণের ফলে আয়নগুলির প্রান্তিক y-গতিবেগ হবে

$$v_y = a_y t = \frac{eEt}{Mv_x} \quad \cdots \quad \cdots \quad 2{\cdot}10$$

এবং y-দিকে মোট সরণের পরিমাণ

$$y = \frac{v_y^2}{2a_y} = \frac{eL^2}{2Mv_x^2} \quad \cdots \quad \cdot \quad 2{\cdot}11$$

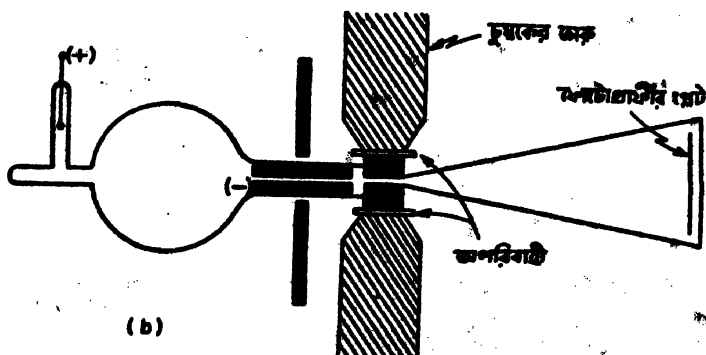
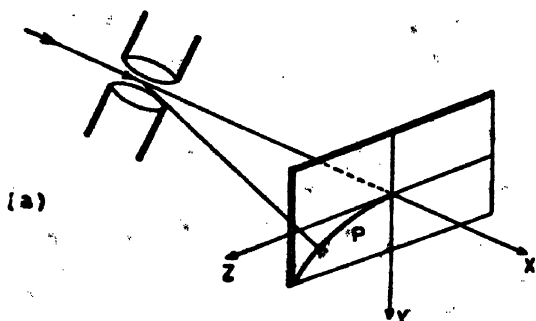
চৌম্বকক্ষেত্রের প্রভাবে আয়নের গতির প্রকৃতি অপেক্ষাকৃত জটিল, এক্ষেত্রে বল সবসময়ই আয়নের গতিবেগ এবং চৌম্বকক্ষেত্র উভয়ের সঙ্গেই লম্বভাবে থাকে এবং এর প্রভাবে আয়নটি একটি বৃত্তাকার পথে চলতে থাকবে। পাতদ্বয়ের অভ্যন্তরে প্রবেশ করার মুহূর্তে আয়নের উপর চৌম্বক বল ঠিক z-দিক বরাবর ক্রিয়া করতে থাকে কিন্তু বৃত্তাকার পথে চলার হেতু ক্রমশঃ বলের দিকের পরিবর্তন ঘটতে থাকে এবং এরকম অবস্থায় মোট সরণের

পরিমাণ গণনা করা অপেক্ষাকৃত কঠিন। তবে আয়নটি যদি খুব অল্প সময়ের জন্য চৌম্বকক্ষেত্রের ভিতর অবস্থান করে তবে আমরা মোটামুটি ধরে নিতে পারি যে ঐ অল্পক্ষণের মধ্যে বলের দিকের বিশেষ পরিবর্তন হয় না, অর্থাৎ ত্বরণ মোটামুটি z-দিকেই ঘটে থাকে। চৌম্বকক্ষেত্রে ত্বরণের ফলে z-দিকে মোট সরণের পরিমাণ এই আলোচনা অনুসরণ করে সহজেই নির্ণয় করা যায়, এইভাবে আমরা পাই

$$F=\frac{Bev_x}{c}=Ma_z$$

এবং

$$z=\frac{1}{2}a_zt^2=\frac{1}{2}\frac{BeL^2}{Mv_xc} \qquad 2{\cdot}12$$

যখন আয়নগুলি বৈদ্যুতিক ও চৌম্বকক্ষেত্রের ভিতর থেকে বেরিয়ে আসে

চিত্র 2·3(a)—ফোটোগ্রাফীর প্লেটের উপর জমে উঠে আয়নগুলি একটি পরাবৃত্তাকার প্রলেপের (P) রেখা সৃষ্টি করে।

চিত্র 2·3(b)—ধনাত্মক আয়নের পরীক্ষায় চুম্বক, ফোটোগ্রাফীর প্লেট এবং আয়নউৎসের আয়োজন।

তখন আর কোনরকম বল এদের উপর ক্রিয়া না করায় এরা সোজা সরলরেখায় চলতে থাকে এবং বাকী পথ একটি সরলরেখায় চলে একটি ফোটোগ্রাফীর প্লেটের উপর এসে পড়ে। উপরোক্ত সমীকরণদ্বয় 2·11 ও 2·12 ব্যবহার করে অতি সহজেই y এবং z এর ভিতর একটি সম্বন্ধ স্থাপন করা যায়, এইভাবে আমরা পাই

$$z^2 = \frac{L^2B^2}{2Ec^2}\frac{e}{M}y \qquad \cdots \quad 2·13$$

এই সমীকরণটি একটি পরাবৃত্তের সমীকরণ অর্থাৎ বৈদ্যুতিক ও চৌম্বকক্ষেত্রময় অঞ্চল যেখানে এসে শেষ হয়েছে ঠিক সেখানে যদি একটি পর্দা রাখা যায় তবে আয়নগুলি পরাবৃত্তাকারে ঐ পর্দার গায়ে এসে জমা হতে থাকবে। 2·13 সমীকরণে e/M অনুপাত ভিন্ন আর সবই পরীক্ষালব্ধ। সুতরাং y এবং z এর পরিমাণ মেপে তা থেকে e/M অনুপাত সহজেই নির্ণয় করা সম্ভব। লক্ষণীয় যে যেসব কণাগুলির e/M অনুপাত পরস্পর পৃথক তারা ভিন্ন ভিন্ন পরাবৃত্তে এসে জড়ো হবে। তবে ঐ পরাবৃত্তগুলির শীর্ষবিন্দু হবে সাধারণ। এভাবেই বিভিন্ন ভরবিশিষ্ট (আধান অভিন্ন) আয়নগুলিকে পৃথক করা ও তাদের ভরের অনুপাত নির্ণয় করা সম্ভব। যদি একই y-স্থানাঙ্কে দুই বিভিন্ন পরাবৃত্তের z-স্থানাঙ্ক নির্দ্ধারিত হয় তাহলে আমরা পাই

$$\frac{z_1^2}{z_2^2} = \frac{(e/M)_1}{(e/M)_2} \qquad \cdots \qquad \cdots \quad 2·14$$

$$= \frac{M_2}{M_1} \text{ যখন আয়নদ্বয়ের আধান অভিন্ন}$$

এখানে উল্লেখযোগ্য 2·11 ও 2·12 সূত্রে y এবং z হল ত্বরণ অঞ্চলের ঠিক প্রান্তে এসে আয়নগুলির মোট যতটা বিচ্যুতি ঘটে তার পরিমাণ। সহজেই দেখান যেতে পারে যে পর্দাটি যদি ত্বরণ অঞ্চলের ঠিক প্রান্তে না রেখে কিছু দূরে রাখা যায়, যেমন ছবিতে দেখান হয়েছে, তাহলেও ঐ পর্দার উপর আয়নগুলি পরাবৃত্তাকারে এসে জমা হবে এবং 2·13 ও 2·14 সম্বন্ধের মতই সহজ সমীকরণ ব্যবহার করে পর্দার উপরের বিচ্যুতির সঙ্গে অন্যান্য পরীক্ষণীয় রাশিগুলির সমন্বয় বিধান করা সম্ভব। এই আলোচনায় বৈদ্যুতিক এবং চৌম্বকক্ষেত্রের তীব্রতা নির্দিষ্ট L বিস্তার সমন্বিত অঞ্চলের ভিতর ধ্রুব এবং এর বাইরে শূন্য ধরা হয়েছে কিন্তু বাস্তবে ক্ষেত্রের তীব্রতার মধ্যে কিছুটা অসমমাত্রতা থাকে এবং ঐ নির্দিষ্ট

অঞ্চলের বাইরেও কিছুদূর পর্যন্ত ক্ষেত্রটি প্রসারিত থাকতে পারে। কিন্তু ক্ষেত্রদ্বয় সর্বত্রই যদি পরস্পর উল্লম্ব থাকে তাহলে দেখান সম্ভব যে অসমমাত্রতা থাকা সত্ত্বেও আয়নগুলি একটি নির্দিষ্ট পরাবৃত্তে এসে জমা হবে। একটি ফোটোগ্রাফীর প্লেটকে পর্দা হিসাবে ব্যবহার করলে পরাবৃত্তের ছবি তার ভিতর ফুটে উঠবে, 2·4 চিত্রে টমসনের পরীক্ষায় প্রাপ্ত এই ধরণের পরাবৃত্তের ছবি দেখান হয়েছে। নিওন আয়নের উপর এই পরীক্ষায় দেখা যায় যে, আয়নগুলি দুটি বিভিন্ন পরাবৃত্তে এসে জমা হয়েছে, এথেকে বোঝা যায় যে, প্রকৃতিজাত নিওনের মধ্যে দুই ধরণের পরমাণু রয়েছে যাদের ভরের পরিমাণ পরস্পর পৃথক। টমসনের পরীক্ষায় প্রমাণ হয় যে, নিওনের দুই ধরণের পরমাণু আছে, এদের একটির পারমাণবিক ওজন 20 এবং অপরটির 22। প্রকৃতিলব্ধ নিওন গ্যাস এই দুই প্রকার পরমাণুর সমষ্টি এবং উভয় পরমাণুর রাসায়নিক গুণাবলী অভিন্ন। বর্ত্তমান পরমাণুবিজ্ঞানের ভাষায় বলা হয়ে থাকে যে নিওনের দুটি আইসোটোপ আছে, যাদের ওজন যথাক্রমে 20 ও 22। 20 এবং 22 অবশ্য ঠিক পারমাণবিক ওজন নয়, এরা পারমাণবিক ওজনের নিকটতম পূর্ণসংখ্যা, এদের বলা হয় পরমাণুর ভরসংখ্যা। পর্দার উপর উপর জমা পরমাণুগুলির ঘনত্ব নির্দ্ধারণ করে প্রাকৃতিক নিওনের ভিতর কোন প্রকার পরমাণুর শতকরা পরিমাণ কত তাও বলা সম্ভব। এখানে বলা উচিত যে, চৌম্বকক্ষেত্র একটি নির্দিষ্ট দিক বরাবর থাকলে পরাবৃত্তের একটি অর্দ্ধাংশই শুধু পাওয়া সম্ভব, অপর অর্দ্ধাংশটি পেতে ক্ষেত্রটি বিপরীতমুখী করে দেওয়া প্রয়োজন।

চিত্র 2·4
টমসনের পরীক্ষায় প্রাপ্ত নিওনের দুটি পৃথক আইসোটোপের জন্য দুটি পৃথক পরাবৃত্ত।

এ্যাস্টনের ভর বর্ণালী মাপনী (Aston's mass spectrograph)

টমসনের পরীক্ষায় নিওনের আইসোটোপ আবিষ্কৃত হলে বিজ্ঞানীরা তৎপর হলেন অন্যান্য মৌলের আইসোটোপগুলির ভরের পরিমাণ নির্দ্ধারণের জন্য। কিন্তু যাবতীয় মৌলের আইসোটোপগুলির উপর পরীক্ষা করতে হলে টমসনের উপরোক্ত পদ্ধতি খুব সহজপ্রযোজ্য নয়, এজন্য পরে নানাধরণের ভর-পরিমাপন যন্ত্র নির্ম্মিত হয়েছে যাদের সাহায্যে বর্ত্তমানে যাবতীয় মৌলের

আইসোটোপগুলির ভর অত্যন্ত নির্ভুলভাবে নির্দ্ধারণ করা সম্ভব। প্রথমেই আমরা বর্ণনা করব এ্যাস্টনের নির্ম্মিত একটি ভর বর্ণালী মাপনী। টমসনের পর বিজ্ঞানী এ্যাস্টন বিভিন্ন আইসোটোপগুলির ভর নির্ণয়ের কাজ ব্যাপকভাবে আরম্ভ করেন এবং তাঁর নির্ম্মিত যন্ত্রের সাহায্যে তিনি বহুসংখ্যক নূতন আইসোটোপ আবিষ্কার করতে সক্ষম হন।

পরাবৃত্ত পদ্ধতিতে আয়নগুলি একটি পরাবৃত্তের আকারে ছড়িয়ে পড়ে এজন্য যেকোন বিন্দুতে আয়নের তীব্রতা হয় অনেক কম। যথেষ্ট পরিমাণে তীব্রতা পেতে হলে যে ফাঁক থেকে আয়নগুলি নির্গত হয়ে আসছে সেটিকে যথেষ্ট চওড়া রাখতে হয় ফলে বিশ্লিষ্টকরণ ব্যাহত হয়। এ্যাস্টনের যন্ত্রে ধনআহিত আয়নগুলি যাদের e/M নির্দ্দিষ্ট কিন্তু গতিবেগ বিভিন্ন সেগুলি একটি ফোকাস বিন্দুতে এসে উপনীত হয়। এতে আয়নের তীব্রতা বহুগুণ বৃদ্ধিপ্রাপ্ত হয় এবং অত্যন্ত সঙ্কীর্ণ ফাঁক ব্যবহার করা যায়। 2·5 চিত্রে এ্যাস্টনের ভরমাপনীর কর্ম্মপদ্ধতি বিশ্লেষণ করা হয়েছে। একটি ছিদ্র করা ক্যাথোডের ভিতর দিয়ে নির্গত হয়ে ধনআহিত আয়নের ধারাটি দুটি ফাঁকের মধ্য দিয়ে চালিত হয়ে একটি সমান্তরাল ধারায় পরিণত হয়। এরপর ধারাটি বৈদ্যুতিক আহিত প্লেটদ্বয় P_1 এবং P_2 এর ভিতর দিয়ে চালিত হয়। যেহেতু এর মধ্যে বিভিন্ন গতিবেগবিশিষ্ট আয়নের অস্তিত্ব আছে, বৈদ্যুতিক ক্ষেত্রের প্রভাবে ধারাটির মধ্যে আয়নগুলি বিভিন্ন পরিমাণে বিক্ষিপ্ত হয়, ফলে ধারাটি অনেকটা ছড়িয়ে পড়ে। প্রথম সহজীকরণ হিসাবে আমরা ধরে নিই যে কণাগুলি যেন বৈদ্যুতিক ক্ষেত্রের মধ্যবিন্দু Z থেকে নির্গত হয়ে আসছে। আয়নগুলি মোট যে দূরত্ব অতিক্রম করে তার তুলনায় বৈদ্যুতিক ক্ষেত্রের ভিতর যে দূরত্ব অতিক্রম করে তার পরিমাণ সামান্য সুতরাং এ ধারণা খুব অস্বাভাবিক নয়। পরে এই কণাগুলি D ফাঁকের মধ্য দিয়ে নির্গত হয়ে একটি বৈদ্যুতিক চুম্বকের মেরুদ্বয়ের মধ্যে এসে পড়ে। চৌম্বকক্ষেত্রটি এমনভাবে থাকে যাতে এর প্রভাবে আয়নগুলি বৈদ্যুতিক ক্ষেত্রে যেদিকে বাঁকে তার উল্টাদিকে বাঁকে। এইভাবে বৈদ্যুতিক ক্ষেত্রে ছড়িয়ে পড়া আয়নগুলি আবার চৌম্বকক্ষেত্রের প্রভাবে একটি নির্দ্দিষ্ট বিন্দুতে ফোকাসে আসে। বিভিন্ন ভরবিশিষ্ট আয়নগুলি পৃথক পৃথক ফোকাসে এসে উপনীত হয়, এইভাবেই বৈদ্যুতিক ও চৌম্বকক্ষেত্রের যুগপৎ প্রভাবে আয়নগুলিকে ফোকাসে আনা হয়। চিত্রে O চিহ্নিত অঞ্চলে চৌম্বকক্ষেত্রের অস্তিত্ব বোঝান হয়েছে।

ধরা যাক বৈদ্যুতিক ক্ষেত্রে কণাগুলি θ কোণে বিচ্যুত হয়, এই কোণটি পরিমাপ করা হয়েছে Z বিন্দু থেকে। চৌম্বকক্ষেত্রের দ্বারা বিক্ষিপ্ত হয়ে

ধারাটি ϕ কোণে বেঁকে যায়। ধরা যাক ধ্রুব বৈদ্যুতিক ক্ষেত্র E এর ভিতর আয়নের গতিপথের দৈর্ঘ্য l এবং চৌম্বকক্ষেত্র B এর ভিতর গতিপথের দূরত্ব L। বৈদ্যুতিক বলের দ্বারা আয়নটির ত্বরণের পরিমাণ Ee/M এবং মোট বিচ্যুতির পরিমাণ $z=\frac{Ee}{2M}\cdot\frac{l^2}{v^2}$

সুতরাং যখন কৌণিক বিচ্যুতির পরিমাণ খুব সামান্য

$$\theta=\frac{z}{\frac{1}{2}l}=\frac{lEe}{Mv^2} \quad \cdots \quad \cdots \quad 2\cdot15$$

তেমনি

$$\phi=\frac{z'}{L}=\frac{LBe}{cMv} \quad \cdots \quad \cdots \quad 2\cdot16$$

এখানে c, আলোর গতিবেগ। এথেকে আমরা সাধারণভাবে লিখতে পারি

$$\theta v^2=k_1 .\ e/M$$
$$\phi v=k_2 .\ e/M$$

এখানে k_1, k_2 দুটি ধ্রুবক, এরা নির্ভর করে শুধু পরীক্ষার জ্যামিতিক আয়োজনের উপর। এই দুটি সম্বন্ধকে অবকলন করলে আমরা পাই

$$\frac{\delta\theta}{\theta}+\frac{2\delta v}{v}=0$$

$$\frac{\delta\phi}{\phi}+\frac{\delta v}{v}=0$$

সুতরাং

$$\frac{\delta\theta}{\theta}=\frac{2\delta\phi}{\phi} \quad \cdots \quad \cdots \quad 2\cdot17$$

কোণদ্বয় $\delta\theta$ এবং $\delta\phi$ একই আধান ও ভর সমন্বিত আয়নগুলিকে নির্দেশ করে যাদের মধ্যে গতিবেগের পার্থক্য হল δv। এই ক্ষুদ্র কোণদ্বয় উভয় ক্ষেত্রে আয়নের ধারাটি কতটা ছড়িয়ে পড়ে তা নির্দেশ করে।

ধরা যাক এরা হ'ল যথাক্রমে শ্লথতম এবং দ্রুততম কণাগুলির মধ্যে কৌণিক দূরত্ব যেগুলি D ফাঁকের ভিতর দিয়ে বেরিয়ে আসে। a যদি Z থেকে O পর্য্যন্ত দূরত্ব হয় তবে O বিন্দুতে ধারাটির বিস্তার হবে $a\delta\theta$। চৌম্বক-ক্ষেত্রের বিচ্যুতি বিশ্লেষণ করতে গিয়েও আমরা এই সহজীকরণ করি যেন চৌম্বকক্ষেত্রের সমগ্র প্রভাব O বিন্দুতে কেন্দ্রীভূত। বৈদ্যুতিক ক্ষেত্রের প্রভাবে ধারাটি যেমন ছড়িয়ে পড়ে তেমনি চৌম্বকক্ষেত্রের প্রভাবে এটি সংহত হয়। যদি ধারাটি চৌম্বকক্ষেত্রে $\delta\phi$ পরিমাণ সংহত হয় তবে

O বিন্দু থেকে সম্মুখের দিকে এর কৌণিক বিচ্যুতি হবে $\delta\theta-\delta\phi$। r যদি O বিন্দুর অগ্রবর্তী কোন দূরত্ব হয় তবে ঐ দূরত্বে ধারাটির প্রসার হবে

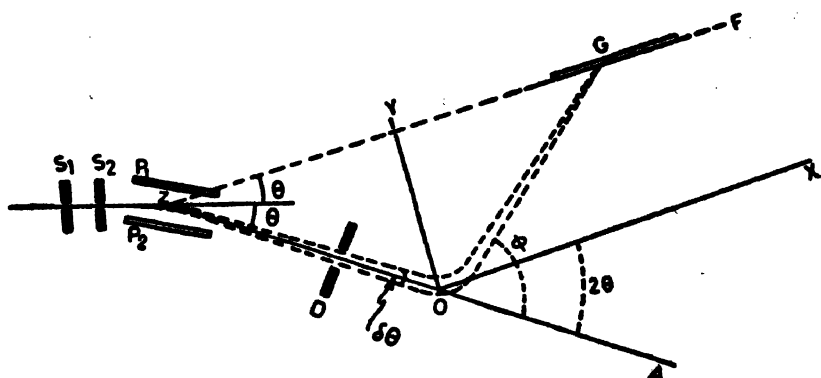
$$W=a\delta\theta+r(\delta\theta-\delta\phi)=\delta\theta\left[a+r\left(1-\frac{\delta\phi}{\delta\theta}\right)\right] \quad \cdots \quad 2{\cdot}18$$

কিন্তু $\dfrac{\delta\phi}{\delta\theta}=\dfrac{\phi}{2\theta}$ এবং ধারাটি যখন ফোকাসে আসে তখন এর প্রসার হয় শূন্য, সুতরাং ফোকাসে আসার সর্ত হিসাবে আমরা লিখতে পারি

$$a+r\left(1-\frac{\phi}{2\theta}\right)=0$$

$$2a\theta=r(\phi-2\theta) \quad \cdots \quad \cdots \quad 2{\cdot}19$$

এই সর্তটি পালিত হলে অভিন্ন e/M কিন্তু বিভিন্ন গতিবেগ সমন্বিত

চিত্র 2·5—এ্যাস্টনের ভর বর্ণালী মাপনীর ক্রিয়াপদ্ধতি।

কণাগুলি একই ফোকাসে এসে উপনীত হবে। মেরুভিত্তিক অঙ্কে এই ফোকাসের স্থানাঙ্ক হবে (r, ϕ)। আবার আয়তধর্ম্মী অঙ্কে, OX এবং OYকে যদি আমরা যথাক্রমে x এবং y অক্ষদ্বয় হিসাবে স্থির করি, তবে Gএর স্থানাঙ্ক হবে $r\cos(\phi-2\theta)$ এবং $r\sin(\phi-2\theta)$। যদি $\phi-2\theta$ কোণটি খুব ছোট হয় তবে $\sin(\phi-2\theta)\sim\phi-2\theta$, এই পরিমাণ শুদ্ধতা গ্রহণ করলে y স্থানাঙ্ক হয় $r(\phi-2\theta)$। এবার ফোকাসে আসার সর্ত 2·19 ব্যবহার করলে আমরা দেখি যে ফোকাসের স্থানাঙ্ক হবে $\{r\cos(\phi-2\theta),\ 2a\theta\}$। y স্থানাঙ্কটি যেহেতু ধ্রুবক বিভিন্ন e/M বিশিষ্ট কণাগুলির OX এর সমান্তরাল একটি সরলরেখার উপর এসে পড়ে এবং OX

থেকে ঐ সরলরেখাটির দূরত্ব হয় $2a\theta$। কিন্তু বৈদ্যুতিক ক্ষেত্রের দ্বারা বিক্ষিপ্ত হয়ে কণাগুলি যখন O বিন্দুতে এসে পৌঁছায় তখন মূল গতিপথ থেকে এদের মোট বিচ্যুতির পরিমাণ $a\theta$। এথেকে বোঝা যায় যে সরলরেখাটি ফোকাস-গুলির সঞ্চারপথ নির্দ্দেশ করে সেটি Z বিন্দু দিয়ে যায়। সুতরাং যদি একটি ফোটোগ্রাফীর প্লেট ZGF রেখা বরাবর বসান যায় সেটি S_1S_2 রেখার সঙ্গে θ কোণ করে থাকে তবে বিভিন্ন e/M সমন্বিত কণাগুলি ঐ প্লেটের উপর বিভিন্ন বিন্দুতে ফোকাসে আসবে। এ্যাস্টনের পদ্ধতির এই বিশ্লেষণে নানারকম সহজীকরণের আশ্রয় নেওয়া হয়েছে কিন্তু নির্ভুলভাবে এই পদ্ধতির বিচার করলেও মূলতঃ একই ফল পাওয়া যায়।

এ্যাস্টনের ভর মাপনী প্রথম নির্ম্মিত হয় 1919 খৃষ্টাব্দে, পরে এই যন্ত্রটির আরও উন্নতিবিধান করা হয়। বিশেষভাবে নির্ম্মিত খুব সঙ্কীর্ণ (0·02 মিমি) দুটি ফাঁকের ভিতর দিয়ে নির্গত হবার পর ধনআহিত আয়নের ধারাটি একটি সরলরেখায় পরিণত হয়ে বিদ্যুৎধারকদ্বয় P_1 এবং P_2 এর মধ্যে এসে পড়ে। P_1 এবং P_2 এর মধ্যে দূরত্ব মাত্র 1·25 মিমি যার ফলে অল্প পরিমাণ বিভব ব্যবধান প্রয়োগ করেই অত্যন্ত তীব্র বৈদ্যুতিক ক্ষেত্র সৃষ্টি করা যায়। D ফাঁকটি অগ্রসরমাণ ধারাটির বিস্তার সংযত করে, তারপর ধারাটি আসে একটি চুম্বকের ক্ষেত্রের ভিতর। চুম্বকটি এমনভাবে বক্রাকৃতি করে নির্ম্মাণ করা হয় যাতে এর ক্ষেত্রের দ্বারা বিক্ষিপ্ত হয়ে আয়নগুলি একটি নির্দ্দিষ্ট ফোকাসে এসে উপনীত হতে পারে। সমস্ত আয়োজনটি অত্যধিক শূন্যতার ভিতর রাখা অবশ্য প্রয়োজন। যদিও ফোটোগ্রাফীর প্লেট যে সমতল বরাবর রাখতে হবে তার অবস্থান গণনার দ্বারা নির্ণয় করা সম্ভব কিন্তু নানারকম সরলীকরণের ফলে এর নির্ভুল অবস্থান নির্দ্দেশ করা একান্তই কঠিন। ফোটোগ্রাফীর প্লেট রাখার স্থানটি এজন্য বারবার পরীক্ষার দ্বারা খুঁজে বের করতে হয় এবং এটি একটি শ্রমসাধ্য কাজ। আয়নগুলির ভর নির্ণয়ের জন্যও উপরিপ্রদত্ত সূত্রগুলি সাধারণতঃ ব্যবহৃত হয় না, ভর নির্ণয় করা হয় সাধারণতঃ কোন মানক ভরের সঙ্গে অজ্ঞাত আয়নের ভরের তুলনা করে। এর জন্য C^{++}, O^{++}, C^{+}, O^{+}, CO^{+} ইত্যাদি আয়নগুলি ব্যবহার করা হয়, এই পরীক্ষার আয়োজনে এদের ভরগুলি যথাক্রমে 6, 8, 12, 16, 28 এই রাশিগুলি অনুপাতে আবির্ভূত হবে। এগুলি ব্যবহার করে একটি মান আরোপণ লেখ (callibration curve) অঙ্কন করা হয় এবং এই লেখটি থেকে একটি নির্দ্দিষ্ট ক্ষেত্রসমন্বয়ের জন্য ফোকাসের অবস্থানের সঙ্গে ভরের সম্বন্ধ নিরূপিত হয়। এরকম একটি মান আরোপণ লেখ প্রস্তুত হয়ে গেলে তখন এর সাহায্যে অজ্ঞাত ভরগুলি নির্ণয় করা যায়।

ফোকাসের অবস্থান নির্ভর করে বৈদ্যুতিক ও চৌম্বকক্ষেত্রের তীব্রতার উপর। ধরা যাক E ও B বৈদ্যুতিক ও চৌম্বকক্ষেত্রের দ্বারা একটি আয়ন যার ভর M, কোন ফোকাসে এসে উপনীত হয়। আবার একটি অজ্ঞাত ভর M', যদি E ও B' ক্ষেত্রের দ্বারা ঠিক সেই বিন্দুতেই ফোকাসে আনা যায় তবে 2·15 এবং 2·16 সমীকরণদ্বয় প্রয়োগ করে আমরা পাই

$$M'/M=(B'/B)^2$$

সাধারণতঃ উভয়ক্ষেত্রে চৌম্বকক্ষেত্রের তীব্রতা ধ্রুব রাখাই সুবিধাজনক, সে অবস্থায়

$$M'/M=E/E'$$

এভাবেও আয়নগুলির ভর নির্ণয় করা সম্ভব তবে অ্যাস্টন এই পদ্ধতির সামান্য একটু পরিবর্তন করে ভর-এর পরিমাণ নির্ণয়ের এক উন্নততর পদ্ধতি প্রবর্তন করেন। ধরা যাক দুটি ভরের মধ্যে তুলনা করতে হবে যাদের একটি অপরটির তুলনায় প্রায় দুই গুণ বেশী। যদি ঠিক দুই গুণ বেশী হয় তবে দুটি ভরের জন্য ফোটোগ্রাফীর প্লেটে যে দাগ সৃষ্টি হয় তাদেরকে ঠিক একই রেখায় এনে ফেলা যায় যথাক্রমে V এবং 2V বিভবদ্বয় ব্যবহার করে। কিন্তু অ্যাস্টন সরাসরি দ্বিগুণ ব্যবধান প্রয়োগ না করে মোট তিনটি পরীক্ষা করলেন, প্রথমটি প্রথম কণাটির জন্য V বিভব প্রয়োগ করে এবং দ্বিতীয় ও তৃতীয়টিতে দ্বিগুণ ভারী কণার জন্য যথাক্রমে $2V+\delta$ এবং $2V-\delta$ বিভব প্রয়োগ করে, δ হল একটি ক্ষুদ্র রাশি। এভাবে তিনটি দাগ পাওয়া গেল। যদি প্রথম দাগটি দ্বিতীয় ও তৃতীয় দাগদ্বয়ের ঠিক মাঝামাঝি না থাকে তবে বুঝতে হবে যে ভরদ্বয় ঠিক 2 : 1 অনুপাতে নেই। যে পরিমাণ প্রতিসমতার অভাব ঘটে তাথেকে বোঝা যায় দ্বিতীয়টি প্রথমটির তুলনায় দ্বিগুণের কতটা কম বা বেশী ভারী। এভাবে অ্যাস্টন দেখালেন H_2 অণুর ওজন হাইড্রোজেন পরমাণুর ওজনের দ্বিগুণ কিন্তু হিলিয়াম অণুর ওজন হাইড্রোজেন অণুর ওজনের দ্বিগুণ নয় অর্থাৎ প্রোটনের ঠিক চারগুণ নয়। এইসব পদ্ধতির দ্বারা অ্যাস্টন দশ হাজার ভাগের একভাগ শুদ্ধতায় বহুসংখ্যক আইসোটোপের ভর নির্ণয় করতে সক্ষম হন।

বেইনব্রিজের (Bainbridge) ভর বর্ণালী মাপনী

অ্যাস্টনের পর আরও বহুসংখ্যক গবেষক নূতন নূতন ভর-বর্ণালী মাপনী নির্মাণ করে অধিকতর শুদ্ধতায় বিভিন্ন আইসোটোপগুলির ভর নির্ধারণ

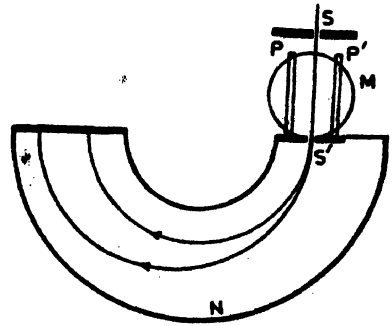
করেছেন। ঐসব ভর-বর্ণালী মাপনীগুলির জটিল গঠন এবং বিভিন্ন গবেষকদের অবদান সম্বন্ধে আলোচনা করার সুযোগ আমাদের নেই, আমরা শুধু অতি সংক্ষেপে এরকম একটি যন্ত্রের ক্রিয়াপদ্ধতির বর্ণনা দেব। এই যন্ত্রটির নির্মাণকর্তা বেইনব্রিজ, এটিও অত্যন্ত উন্নতধরণের যন্ত্র তবে এটির ক্রিয়াপদ্ধতি অপেক্ষাকৃত সরল।

2·6 চিত্রে যন্ত্রটির আয়োজন দেখান হয়েছে। বহিঃস্থ একটি প্রকোষ্ঠে বিভিন্ন মৌলের পরমাণুগুলিকে আয়নে পরিণত করার ব্যবস্থা থাকে, পরে আয়নগুলিকে একটি সরু ফাঁক S এর ভিতর দিয়ে মূল যন্ত্রের ভিতর চালিত করে দেওয়া হয়। এরপর আয়নগুলি P, P′ পাত দুটির ভিতর দিয়ে চলতে থাকে, ঐ দুটির ভিতরে একটি ধ্রুব বৈদ্যুতিক ক্ষেত্র এবং বৈদ্যুতিক ক্ষেত্রের সঙ্গে লম্বভাবে একটি চৌম্বকক্ষেত্র থাকে (2·6 চিত্রে চৌম্বকক্ষেত্রটির অবস্থিতি একটি বৃত্ত M এঁকে বোঝান হয়েছে), অর্থাৎ পাত দুটির মাঝখানে ক্ষেত্রদ্বয়ের আয়োজন ঠিক ইলেকট্রনের e/m পরিমাপের আয়োজনের মত। S ফাঁকের মুখোমুখি আরেকটি ফাঁক S′, বৈদ্যুতিক ও চৌম্বকক্ষেত্র অতিক্রম করে যে আয়নগুলি S′ এর ভিতর দিয়ে বেরিয়ে আসে তাদের বেলায় স্পষ্টতঃই ক্ষেত্রদ্বয়ের বল পরস্পর সমান এবং বিপরীতমুখী। সুতরাং কোন বিশেষ পরিমাণের গতিবেগসম্পন্ন আয়নই শুধু S′ এর ভিতর দিয়ে বেরিয়ে আসতে সক্ষম হয়। ঐ বিশেষ গতিবেগের পরিমাণ বৈদ্যুতিক ও চৌম্বক বলদ্বয়কে পরস্পর সমান ধরলে তাথেকে পাওয়া যায় এবং পূর্ব্বে 2·5 সূত্রে এই গতিবেগ এভাবে নির্দ্ধারিত হয়েছে। সুতরাং বৈদ্যুতিক ও চৌম্বকক্ষেত্রের তীব্রতার পরিমাণ, E এবং B, জানা থাকলে S′ ফাঁকের ভিতর দিয়ে নির্গত আয়নগুলির গতিবেগ সহজেই নির্দ্ধারণ করা যায়। S′ ফাঁকের ভিতর দিয়ে বেরিয়ে এসে আয়নগুলি একটি বৃহদাকার প্রকোষ্ঠ N এর ভিতর এসে পড়ে। N কক্ষেও আয়নের গতিপথের সঙ্গে লম্বভাবে একটি চৌম্বকক্ষেত্র থাকে এবং এর প্রভাবে আয়নের গতিপথ 180° বেঁকে গিয়ে অবশেষে এগুলি একটি ফোটোগ্রাফীর প্লেটের উপর এসে পড়ে সেখানে একটি দাগের সৃষ্টি করে। 2·6 চিত্রে N কক্ষের ভিতর কণাটি যদি বইয়ের পাতার সমতলে চলতে থাকে তবে চৌম্বকক্ষেত্র স্থাপন করতে হবে ঐ সমতলের সঙ্গে লম্বভাবে। ধরা যাক কক্ষের ভিতর চৌম্বকক্ষেত্রের তীব্রতার পরিমাণ B, আয়নের উপর চৌম্বক বল নিম্নলিখিত সর্ত্তটির দ্বারা নির্দ্ধারিত

$$\frac{Mv^2}{R}=\frac{Bev}{c}$$

অর্থাৎ,

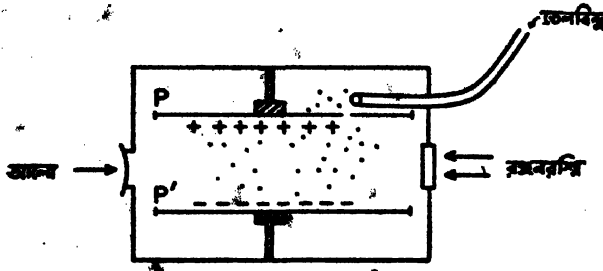
$$M = \frac{eBR}{vc} \quad \cdots \quad \cdots \quad 2{\cdot}20$$

বর্তমান পরীক্ষায় e, B এবং v এর পরিমাণ ধ্রুব, কারণ প্রতিটি আয়ন যেগুলি S′ ফাঁকের ভিতর দিয়ে নির্গত হয়ে এসেছে তাদের গতিবেগ হবে v, সুতরাং আয়নের ভর M নির্ভর করবে একমাত্র বক্রতার ব্যাসার্দ্ধ R এর উপর। ফোটোগ্রাফীর প্লেটের উপর দাগের অবস্থান দেখে R এর পরিমাণ নির্ণয় করা যায় এবং তাথেকে এদের ভর নির্ণীত হয়। পরীক্ষার আয়োজন থেকে স্পষ্টই বোঝা যায় যে, যদিও আয়নের ধারাটির মধ্যে বিভিন্ন e/M বিশিষ্ট আয়ন থাকতে পারে কিন্তু যেগুলি S′ ফাঁকের মধ্য দিয়ে যায় তাদের সকলেরই অভিন্ন গতিবেগ v থাকে। সুতরাং 2·20 সর্ত থেকে ধ্রুব চৌম্বকক্ষেত্রে ফোকাসে আসা আয়নগুলির ভর এদের গতিপথের বক্রতার ব্যাসার্দ্ধের সমানুপাতী। এই নীতিটি প্রয়োগ করলে আয়নগুলির ভর নির্দ্ধারণ করা সহজ হয়ে পড়ে। কোন কোন যন্ত্রের আয়োজনে R এর পরিমাণ ধ্রুব রাখা হয়, চৌম্বকক্ষেত্রের তীব্রতা কমিয়ে বাড়িয়ে প্রত্যেক প্রকার আয়নকেই একটি নির্দ্দিষ্ট ফোকাসে এনে ফেলা হয়। এক্ষেত্রেও 2·20 সম্বন্ধ প্রয়োগ করে M এর মান নির্ণয় করা সম্ভব, সেক্ষেত্রে M ও B এর ভিতর সরল অনুপাত স্থাপিত হয়।

চিত্র 2·6—বেইনব্রিজের ভর বর্ণালী মাপনী।

বেইনব্রিজের যন্ত্রে পরিমাপের সূক্ষ্মতা নির্ভর করে বর্গায়তনের পরিমাণের উপর যেখানে ধ্রুব চৌম্বক-ক্ষেত্র বজায় রাখা যায় এবং ঐ ক্ষেত্রের তীব্রতার উপর। এজন্য বেইনব্রিজ বিরাট একটি চুম্বক ব্যবহার করেন যার দ্বারা 40 সেমি ব্যাসবিশিষ্ট একটি অর্দ্ধবৃত্তাকার বর্গায়তনের উপর 15000 গস্ ধ্রুবক্ষেত্র বজায় রাখা সম্ভব হয়েছিল।

ইলেক্ট্রনের আধান

এ পর্য্যন্ত যে পরীক্ষাগুলির বিষয় বর্ণনা করা হয়েছে সেগুলিতে সর্ব্বত্রই ইলেকট্রন কিংবা আয়নের আধান এবং ভরের অনুপাত কিংবা

আয়নের ভরের অনুপাত মাপা হয়। যদি কোন পরীক্ষায় পৃথকভাবে ইলেকট্রনের আধান মাপতে পারা যায় তবে এর e/m এর পরিমাণ থেকে এর ভর নির্ণয় করা যায়। বর্তমানে আমরা ইলেকট্রনের আধান যেভাবে মাপা হয়েছে সেই পরীক্ষাটির বিষয় বিশদভাবে আলোচনা করব। পরীক্ষাটি প্রথম করেন মার্কিন বিজ্ঞানী মিলিকান (Millikan), এজন্য এটি মিলিকানের পরীক্ষা নামে সুপ্রসিদ্ধ। পরীক্ষার মূল সম্পাদ্য হ'ল ধ্রুব বৈদ্যুতিক ক্ষেত্রে একটি অতি ক্ষুদ্র আহিত তেলের ফোঁটার গতি বিশ্লেষণ করা। 2·7 চিত্রে পরীক্ষার আয়োজনের ছকটি দেখান হয়েছে। P এবং P′ দুটি

চিত্র 2·7—ইলেকট্রনের আধান নির্ণয়ের জন্য
মিলিকানের পরীক্ষার আয়োজন।

বিদ্যুৎধারক পাত যাদের মধ্যে ধ্রুব বৈদ্যুতিক ক্ষেত্র বর্তমান। এ্যাটমাইজার যন্ত্রের সাহায্যে সৃষ্ট অতি ক্ষুদ্র ক্ষুদ্র তেলের ফোঁটা এই পাত দুটির ভিতর প্রবেশ করিয়ে দেওয়া হয়। কক্ষটির ভিতর বাইরে থেকে আলো ফেলার ব্যবস্থা আছে। এটির মধ্যে পর্যবেক্ষণ করার গবাক্ষও আছে, তবে ফোঁটাগুলি খুবই ক্ষুদ্র ($\sim 5 \times 10^{-4}$ সেমি ব্যাস) এজন্য এগুলিকে অণুবীক্ষণের সাহায্যে পর্যবেক্ষণ করতে হয়। যখন এ্যাটমাইজার যন্ত্রে এই ক্ষুদ্র ক্ষুদ্র তেলের ফোঁটাগুলি উৎপন্ন করা হয় তখন সচরাচর এরা আহিত অবস্থায় উৎপন্ন হয়, তাছাড়া বাইরে থেকে প্রকোষ্ঠটির ভিতর রঞ্জনরশ্মি প্রয়োগ করে আয়নীভবন ঘটাবার ব্যবস্থাও থাকে। আহিত অবস্থায় বৈদ্যুতিক ক্ষেত্রের মধ্যে হাওয়ায় ভাসতে থাকলে তেলের ফোঁটাগুলির উপর বৈদ্যুতিক বল ক্রিয়া করবে। সেক্ষেত্রে যদি কোন একটি ফোঁটার ভিতর q পরিমাণ ঋণ আধানের অস্তিত্ব থাকে তবে এর উপর বৈদ্যুতিক আকর্ষণী বল ঊর্ধ্বমুখী হবে (চিত্র 2·7) এবং এই বলের পরিমাণ হয়

$$F = qE$$

চিত্রে P, P′ পাতদ্বয় ক্ষিতিজের সঙ্গে সমান্তরালভাবে আছে, মনে করা যাক যাবতীয় বলের সম্মিলিত ক্রিয়ার ফলে একটি তেলের ফোঁটা ধ্রুব গতিবেগে উপরের অর্থাৎ P পাতের দিকে উঠছে। যখন ফোঁটাটির উপর ক্রিয়াশীল যাবতীয় বল একটি বলসাম্যের সৃষ্টি করে তখন আমরা নিম্নলিখিত সম্বন্ধটি পাই

$$qE + F_B - W - kv_E = 0 \qquad \cdots \quad 2{\cdot}21$$

তেলের ফোঁটার ভিতর ধন এবং ঋণ উভয়বিধ আধানই সংগৃহীত হতে পারে, ধরে নেওয়া যাক আধানের প্রকৃতি এমন যে বৈদ্যুতিক বল qE সবসময় উপরের দিকে অর্থাৎ P পাতের অভিমুখে ক্রিয়া করে। F_B, তেলের ফোঁটার উপর বায়ুমণ্ডলের প্লবতাজনিত ঊর্ধ্বমুখী বল, W, তেলের ফোঁটার ওজন এবং kv, চলমান ফোঁটার উপর বায়ুমণ্ডলের সান্দ্রতাজাত বল যা গতিবেগের সমানুপাতী, শেষোক্ত বল দুটি নীচের দিকে ক্রিয়া করে। যখন ক্রিয়াশীল মোট ঊর্ধ্বমুখী ও নিম্নমুখী বলের পরিমাণ সমান তখন আর কোন ত্বরণ থাকে না এবং ফোঁটাটি তখন একটি ধ্রুব গতিবেগ নিয়ে উপরের দিকে উঠতে থাকে। 2·21 সমীকরণ এই অবস্থাই সূচিত করে। এই সমীকরণে k অবশ্য একটি ধ্রুবক। অণুবীক্ষণের ভিতরে একটি মাপনী থাকে এবং এর দ্বারা নির্দিষ্ট কোন দূরত্ব অতিক্রম করতে ফোঁটাটির কত সময় লাগে তা দেখে গতিবেগের পরিমাণ সহজেই মাপা যায়। 2·21 সমীকরণে F_B, W, k ইত্যাদি অজ্ঞাত রাশিগুলির পরিমাণ শুদ্ধভাবে পৃথক পৃথক পরীক্ষায় মাপা কঠিন, তবে দ্বিতীয় একটি পরীক্ষার দ্বারা ঐ রাশিগুলি একত্রে অপনয়ন (elimination) করা যায়। যদি সঞ্চায়ক (condenser) পাত দুটির মধ্য থেকে বৈদ্যুতিক যোগাযোগ সরিয়ে নেওয়া যায়, অর্থাৎ যখন $E = 0$, তখন মূলতঃ মাধ্যাকর্ষণের প্রভাবে তেলের ফোঁটা নীচের দিকে নামতে থাকে এবং যখন এই নিম্নমুখী গতিবেগ একটি ধ্রুব পরিমাণে এসে পৌঁছায় তখন বলসাম্যের দরুণ আমরা পাই

$$F_B + kv_g = W \qquad \cdots \qquad \cdots \quad 2{\cdot}22$$

এখানে v_g মাধ্যাকর্ষণের প্রভাবে ধ্রুব নিম্নমুখী গতিবেগের পরিমাণ। এই সম্বন্ধটি 2·21 সমীকরণে প্রয়োগ করলে আমরা পাই

$$qE - kv_g - kv_E = 0$$

$$q = \frac{k(v_E + v_g)}{E} \qquad \cdots \qquad \cdots \quad 2{\cdot}23$$

এই সম্বন্ধ থেকে আধানের পরিমাণ q মাপা সম্ভব হয় যদি k জানা থাকে। k ধ্রুবকটির মান নির্ণয় করা যায় স্টোকসের আবিষ্কৃত একটি সূত্র প্রয়োগ

করে। একটি বর্তুলাকার বস্তু কোন চলীয় (fluid) মাধ্যমের ভিতর দিয়ে ধ্রুব গতিবেগ নিয়ে চলতে থাকলে এর উপর যে পরিমাণ সান্দ্রতাজনিত বল ক্রিয়া করতে থাকে তা স্টোকসের সূত্র থেকে পাওয়া যায়। ধরা যাক, a হ'ল বর্তুলের ব্যাসার্দ্ধ বা এটি যে মাধ্যমের ভিতর দিয়ে চলছে তার অণুগুলির গড়মুক্ত পথের তুলনায় অনেক বড়, η, যে মাধ্যমের ভিতর দিয়ে বর্তুলটি চলছে তার সান্দ্রতায় সহগ, তাহলে

$$kv_g = 6\pi\eta a v_g \qquad \cdots \quad 2{\cdot}24$$

এইটিই হ'ল স্টোকসের সূত্র। কোন গ্যাসের, বিশেষ করে বাতাসের η-র পরিমাণ অপেক্ষাকৃত সহজ পরীক্ষায় মাপা যায়। a যদি তেলের ফোঁটার ব্যাসার্দ্ধ হয় এবং ρ তেলের ঘনত্ব ও ρ_0 বায়ুর ঘনত্ব হয়, তাহলে

$$W = \tfrac{4}{3}\pi a^3 \rho g, \quad F_B = \tfrac{4}{3}\pi a^3 \rho_0 g$$

সুতরাং স্টোকস সূত্র প্রয়োগ করলে 2·22 সম্বন্ধটি নিম্নলিখিত উপায়ে লেখা যায়

$$\tfrac{4}{3}\pi a^3(\rho - \rho_0)g = 6\pi\eta a v_g$$

এথেকে

$$a = \left[\frac{9\eta v_g}{2(\rho-\rho_0)g}\right]^{\frac{1}{2}} \qquad \cdots \quad 2{\cdot}25$$

এবার 2·23, 2·24 সূত্রগুলি একত্র করলে আমরা লিখতে পারি

$$q = \frac{4\pi}{3}\left(\frac{9\eta}{2}\right)^{\frac{3}{2}}\left(\frac{1}{g(\rho-\rho')}\right)^{\frac{1}{2}} \frac{v_g + v_E}{E} v_g^{\frac{1}{2}} \qquad \cdots \quad 2{\cdot}26$$

যেহেতু, η, v_g, ρ, ρ_0 ইত্যাদি রাশিগুলি সহজ পরীক্ষায় মাপা যায়, 2·26 সূত্রটি থেকে সহজেই q নিরূপিত হয়। পরীক্ষায় নির্দ্ধারণযোগ্য রাশি মাত্র দুটি, v এবং v_g, অন্যান্য রাশিগুলির মান স্বতন্ত্র পরীক্ষায় জানা থাকে। ফোঁটার উপর ধন ও ঋণ উভয়বিধ আধানই এসে জমতে পারে, আধানের চিহ্ন বাদ দিলে যাবতীয় আধান ইলেকট্রনের আধানের পূর্ণসংখ্যক গুণিতক। সুতরাং যেকোন ধরনের আধানের পরিমাণ মেপেই ইলেকট্রনের আধান নির্ণয় করা যায়। পরীক্ষাধীন অবস্থায় তেলবিন্দুটির ভরের পরিমাণ এবং বৈদ্যুতিক ক্ষেত্রের তীব্রতা ধ্রুব থাকে। এজন্য এর ভিতর আধান কমে বা বেড়ে গেলে এর গতিবেগের পরিমাণ সেই সঙ্গে সঙ্গে পরিবর্তিত হয়, কিন্তু 2·26 সমীকরণটি প্রযোজ্য থাকে এবং এটি প্রয়োগ করে বিভিন্ন অবস্থায় ফোঁটার ভিতর আধানের পরিমাণ নির্ণয় করা যায়। এইভাবে

একটি বিশেষ ফোঁটা নিয়ে পরীক্ষা করে যে বিভিন্ন আধানের পরিমাণ মাপা হয়েছে সেগুলি বিচার করলে দেখা যায় যে ফোঁটার উপর আধানের পরিমাণ সবসময়ই কোন একটি বিশেষ পরিমাণ আধানের পূর্ণসংখ্যক গুণিতক হিসাবে অবস্থান করে। অর্থাৎ নির্ণীত পরিমাণগুলির গ. সা. গু. হ'ল একটি বিশেষ আধান যার চেয়ে কম পরিমাণের আধান কোন পরীক্ষাতেই দৃষ্ট হয় না। সুতরাং এই সর্ব্বনিম্ন আধানই যাবতীয় পরিমাণ আধানের একক এবং এইটিই ইলেকট্রনের আধান। এই সর্ব্বনিম্ন আধানের অধুনাস্বীকৃত পরিমাণ হ'ল

$$e=(4\cdot80286\pm0\cdot00008)\times10^{-10} \text{ স্থির বৈদ্যুতিক একক}$$

e এবং e/m এর পরিমাণ জানা হলে m এর পরিমাণ নির্দ্ধারিত হয়

$$m=(9\cdot1085\pm0\cdot0003)\times10^{-28} \text{ গ্রাম।}$$

মিলিকান তেল এবং পারদের ফোঁটা নিয়ে পরীক্ষা করেন। এদের উভয়েরই বাষ্পীভবনের পরিমাণ খুব কম এজন্য পরীক্ষাধীন সময়ের মধ্যে ফোঁটাগুলির ব্যাসার্দ্ধ নির্দ্দিষ্ট থাকে। একটি বিশেষ ফোঁটাকে অনেকক্ষণ ধরে লক্ষ্য করলে তাথেকেই ইলেকট্রনের আধান নির্ণয় করা যায় কারণ ফোঁটার ভিতর আধানের পরিমাণ থেকে থেকে পরিবর্ত্তিত হয়, এজন্য মিলিকানের পরীক্ষায় অনেক সময় একটিমাত্র ফোঁটাকে ঘণ্টার পর ঘণ্টা ধরে লক্ষ্য করা হয়েছিল। মিলিকান লক্ষ্য করেন যে বৃহদাকার ফোঁটাগুলির ক্ষেত্রে এভাবে প্রাপ্ত ইলেকট্রনের আধান মোটামুটি নির্দ্দিষ্ট ধ্রুব পরিমাণের হয় কিন্তু ফোঁটাগুলি যতই ক্ষুদ্র থেকে ক্ষুদ্রতর হতে থাকে ততই নির্দ্ধারিত ইলেকট্রনের আধান ক্রমশঃ বৃদ্ধি পায়। ইলেকট্রনের আধান যে এভাবে ফোঁটাগুলির ব্যাসার্দ্ধের ব্যস্ত অনুপাতে বৃদ্ধি পায় তার কারণ 2·24 সম্বন্ধে স্টোকসের সূত্রটি যেভাবে লেখা হয়েছে তা খুব ক্ষুদ্র ফোঁটাগুলির ক্ষেত্রে প্রযোজ্য নয়। খুব ক্ষুদ্র ফোঁটার জন্য স্টোকসের সূত্রের শুদ্ধীকরণ প্রয়োজন, সূত্রটি তখন হবে

$$kv_g=6\pi\eta av_g\Big/\left(1+\frac{C\lambda}{a}\right) \quad \cdots \quad \cdots \quad 2\cdot24'$$

এখানে λ হচ্ছে যে গ্যাসের ভিতর দিয়ে ফোঁটাগুলি চলছে তার অণুগুলির গড় মুক্ত পথ এবং C একটি ধ্রুবক। 2·24′ সূত্রটি বিচার করলে বোঝা যায় যে উপরোক্ত শুদ্ধীকরণ প্রয়োগ করতে হলে 2·26 সূত্রে যেখানেই v_g অথবা v_E আবির্ভূত হচ্ছে সেখানেই $(1+C\lambda/a)$ রাশিটির দ্বারা ভাগ করা প্রয়োজন। এইভাবে শুদ্ধীকৃত স্টোকসের সূত্রটি প্রয়োগ করলে এবার খুব ক্ষুদ্র ফোঁটাগুলির ভিতর আধানের পরিমাণ হিসাবে আমরা পাই

$$q_0 = \frac{4\pi}{3}\left(\frac{9\eta}{2}\right)^{\frac{3}{2}}\left(\frac{1}{g(\rho-\rho')}\right)^{\frac{1}{2}} \frac{v_g + v_E}{E\left(1+\frac{C\lambda}{a}\right)^{\frac{3}{2}}} v_g^{\frac{1}{2}} \quad \cdots \quad 2{\cdot}26'$$

2·26 ও 2·26′ সমীকরণদ্বয় বিচার করলে দেখা যায় যে শুদ্ধীকরণ প্রয়োগের পূর্বে প্রাপ্ত ইলেকট্রনের আধান যদি e হয় তবে শুদ্ধীকৃত আধানের পরিমাণ হবে

$$e_0 = e/\left(1+\frac{C\lambda}{a}\right)^{\frac{3}{2}} \quad \cdots \quad \cdots \quad 2{\cdot}27$$

সুতরাং ইলেকট্রনের আধানের পরীক্ষালব্ধ পরিমাণ ফোঁটাগুলির ব্যাসার্দ্ধের সাথে সাথে কিভাবে পরিবর্তিত হয় সেই লেখচিত্রটি অঙ্কন করলে তাথেকে ধ্রুবক C নির্ণয় করা যায় এবং তার ফলে নির্ভুল পরিমাণ e_0 নির্ণয় করা সম্ভব হয়। মিলিকানের পরবর্ত্তী যুগে অন্যান্য কতগুলি অপ্রত্যক্ষ পদ্ধতিতে ইলেকট্রনের আধান নির্ণয় করা সম্ভব হয়, কিন্তু দেখা যায় মিলিকানের নির্দ্ধারিত পরিমাণের সঙ্গে এই নূতন পরিমাণগুলি মেলে না। পরে দেখা যায় যে মিলিকান বাতাসের সান্দ্রতার যে মান ব্যবহার করেন তা খুব শুদ্ধ নয়, অতি আধুনিক ও নির্ভুলতর সান্দ্রতার মান মিলিকানের গণনায় প্রয়োগ করলে যে শুদ্ধীকৃত নূতন পরিমাণ পাওয়া যায় তা হ'ল $e = (4{\cdot}8036 \pm 0{\cdot}0048) \times 10^{-10}$ স্থির বৈদ্যুতিক একক। এই পরিমাণ অন্যান্য পদ্ধতির দ্বারা প্রাপ্ত পরিমাণের সঙ্গে সম্পূর্ণ সামঞ্জস্যপূর্ণ।

মিলিকানের পরীক্ষাতেই সর্ব্বপ্রথম শুদ্ধভাবে ইলেকট্রনের আধান নির্ণীত হয় কিন্তু মিলিকানের পূর্ব্বেও কয়েকজন গবেষক অনেকটা একই ধরণের পরীক্ষায় ইলেকট্রনের আধান নির্ণয় করার চেষ্টা করেন। এদের মধ্যে উইলসনের পরীক্ষাটি উল্লেখযোগ্য। এই পরীক্ষাটি নির্ভর করে একটি বিশেষ ভৌত প্রক্রিয়ার উপর, সেটি হচ্ছে এই: পরিপৃক্ত জলবাষ্পকে অকস্মাৎ তাপবিনিময়বিহীনভাবে সম্প্রসারিত করা হলে তা ঠাণ্ডা হয়ে গিয়ে অতিপরিপৃক্ত হয়ে পড়ে। এই অতিপরিপৃক্ত জলবাষ্প এক একটি আহিত অণু বা পরমাণুর উপর জমে উঠতে থাকে এবং এভাবে ক্ষুদ্র ক্ষুদ্র আহিত জলকণা সৃষ্টি হয়। উইলসনের পরীক্ষায় দুটি পাতের মাঝখানে এরকম জলকণার মেঘ প্রবেশ করিয়ে দিয়ে তারপর শুধুমাত্র মাধ্যাকর্ষণের প্রভাবে এই মেঘের উপরিতলটি কিভাবে ক্রমশঃ নীচের দিকে নেমে যেতে থাকে তা লক্ষ্য করা হয়। পরে পাত দুটিকে আহিত করা হয়, বাষ্পবিন্দুগুলি তখন মাধ্যাকর্ষণ এবং বৈদ্যুতিক ক্ষেত্র এই দুইএর মিলিত প্রভাবে নীচের

দিকে নামতে থাকে, এই দুই গতিবেগ তুলনা করে তাথেকে ইলেকট্রনের আধানের একটা পরিমাণ নির্ণয় করা যায়। উইলসনের পরীক্ষায় শুধু জলবাষ্পের মেঘের উপরিতলের পতনের হার নির্ণয় করা হয় এবং যেহেতু অপেক্ষাকৃত অধিক পরিমাণে আহিত ফোঁটাগুলি বৈদ্যুতিক ক্ষেত্রের প্রভাবে অধিক দ্রুত গতিতে নীচের দিকে নেমে যায় সুতরাং পরীক্ষাটি আসলে করা হয় সবচেয়ে কম পরিমাণে আহিত জলবিন্দুগুলির উপর। জলবিন্দুগুলির গতি বিশ্লেষণ করে তাথেকে ইলেকট্রনের আধান নির্ণয় করতে হলে দুটি সর্তের প্রয়োজন। প্রথমটি হ'ল, স্টোকস সূত্রের সত্যতা ধরে নিতে হবে কিন্তু এই সূত্রটি যে অতি ক্ষুদ্র ফোঁটার ক্ষেত্রে খাটে না তা আমরা আগেই বলেছি, শুদ্ধীকরণ প্রয়োগেরও কোন সম্ভাবনা নেই কারণ এই পরীক্ষায় একক একটি ফোঁটার উপর পর্য্যবেক্ষণ করা যায় না। দ্বিতীয় সর্তটি হ'ল এই যে, ফোঁটাগুলি আকারে সবাই সমান এবং এদের ভিতর থেকে বাষ্পীভবন ঘটে না। এই সর্তটিও প্রচুর ভুলের সম্ভাবনা বহন করে। উইলসন্ এভাবে ইলেকট্রনের যে আধান মাপেন তা হ'ল $3{\cdot}1 \times 10^{-10}$ স্থির বৈদ্যুতিক একক।

আপেক্ষিকতাতত্ত্ব (Relativity Theory)

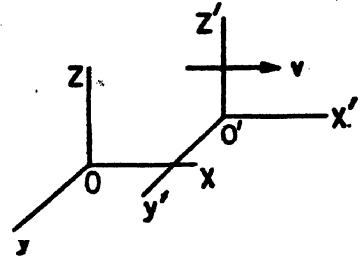
আইনস্টাইনের আপেক্ষিকতাতত্ত্ব পরমাণুবিজ্ঞানে অত্যন্ত ব্যাপকভাবে প্রযুক্ত হয়েছে এবং এই তত্ত্বকে বাদ দিয়ে পরমাণুবিজ্ঞানের আলোচনা সম্ভব নয়। বর্ত্তমানে আমরা আপেক্ষিকতাতত্ত্ব সম্বন্ধে কিছু আলোচনা করব যদিও স্থানাভাবহেতু অপেক্ষাকৃত জটিল গাণিতিক সমস্যাবলী নিয়ে আলোচনা করার সুযোগ হবে না, শুধু এই তত্ত্বের ফলাফলগুলি কি এবং কিভাবে এগুলি পরমাণুবিজ্ঞানের আলোচনার পক্ষে অপরিহার্য্য শুধু সেই বিষয়গুলিই সংক্ষিপ্ত ভাবে আলোচিত হবে।

আপেক্ষিকতাতত্ত্বের সূচনা হয় মার্কিন বিজ্ঞানীদ্বয় মাইকেলসন এবং মর্লির (Michelson & Morley) একটি যুগান্তকারী পরীক্ষার মধ্য দিয়ে। এই পরীক্ষায় মহাশূন্যের ভিতর দিয়ে পৃথিবীর পরম গতিবেগ পরিমাপ করার চেষ্টা হয়। সূর্য্যের চারপাশে আবর্ত্তনের ফলে পৃথিবীর সবসময়েই একটি গতিবেগ আছে, এর পরিমাণ হ'ল গড়ে সেকেণ্ডে প্রায় 30 কিলোমিটার। ম্যাকসওয়েল আলোর বিদ্যুৎচুম্বকীয় প্রকৃতি উত্থাপন করার সময় প্রস্তাব করেছিলেন যে মহাশূন্য ইথার নামক এক মাধ্যমে পূর্ণ, ইথারের নির্দ্দিষ্ট বিদ্যুৎচুম্বকীয় ধর্ম্মাবলী রয়েছে যার ফলে এর ভিতর দিয়ে আলোর গতি সম্ভব হয়। যেহেতু সমস্ত জগৎ ইথারে পরিপূর্ণ একে একটি পরম কাঠামো হিসাবে কল্পনা করা যায় এবং তখন এর আপেক্ষিকে

গ্রহ নক্ষত্র ইত্যাদি বস্তু যারা ইথারের ভিতর দিয়ে ছুটে চলেছে তাদের পরম গতিবেগ নির্ণীত হতে পারে। সূর্য্যপরিক্রমণজনিত গতিবেগ ছাড়াও পৃথিবীর অন্যান্য গতিবেগ থাকতে পারে, যেমন মহাশূন্যের ভিতর দিয়ে সমগ্র সৌর-মণ্ডলটির একটি নির্দিষ্ট গতিবেগ আছে বলে জানা যায়, ইথারের পরিপ্রেক্ষিতে পৃথিবীর যে গতিবেগ নির্ণীত হবে তা হ'ল এইসব বিভিন্ন গতিবেগের সম্মিলিত ফল, একেই পরম গতিবেগ আখ্যা দেওয়া হয়েছে। ইথারের ভিতর আলোর বেগ ধ্রুব এবং আলোর গতিবেগের সঙ্গে তুলনা করে ইথারের পরিপ্রেক্ষিতে পৃথিবীর গতিবেগ নির্ণয় করার জন্য একটি পরীক্ষার আয়োজন তৈরী করা সম্ভব এবং সেইটিই হল মাইকেলসন-মর্লির পরীক্ষা। এই পরীক্ষার বিশদ বিবরণ দিতে আমরা বিরত থাকব তবে পরীক্ষার ফলাফল খুবই আশ্চর্য্যজনক, দেখা যায় যে এই পরীক্ষায় নির্ণীত পৃথিবীর পরম গতিবেগ সবসময়ই শূন্য। পৃথিবীর কক্ষীয় আবর্ত্তন জনিত গতিবেগের কোন প্রভাবই এই পরীক্ষার ভিতর লক্ষিত হয় না যদিও পরীক্ষার আয়োজন এতই উন্নত ধরণের যে এই গতিবেগের প্রভাব তাতে অবশ্যই দৃষ্ট হবার কথা। পরীক্ষাটি পৃথিবীপৃষ্ঠের উপর বিভিন্ন অক্ষাংশে এবং উচ্চতায় এবং বৎসরের বিভিন্ন সময়ে করা হয়েছে কিন্তু প্রতিক্ষেত্রেই নির্দ্ধারিত গতিবেগের পরিমাণ হয়েছে শূন্য। সনাতন নিউটনীয় পদার্থবিজ্ঞান অনুযায়ী কোনভাবেই এই পরীক্ষার নেতিমূলক ফলাফল বিশ্লেষণ করা যায় না। এই পরীক্ষার পর দেশ, কাল, আলোর প্রকৃতি এবং পদার্থবিজ্ঞানের নিয়মাবলী সম্বন্ধে নূতন দৃষ্টিভঙ্গী গ্রহণের প্রয়োজন অনুভূত হয় এবং এইভাবেই আপেক্ষিকতাতত্ত্বের সূচনা হয়।

এই পরীক্ষার কিছুদিন পর আইনস্টাইন কয়েকটি বলিষ্ঠ প্রকল্প উত্থাপন করে পরীক্ষালব্ধ ফলাফল ব্যাখ্যা করতে সক্ষম হলেন, শুধু তাই নয়, ঐ প্রকল্পগুলি থেকে আরও অনেক ফলাফল পাওয়া গেল যেগুলি পদার্থ-বিজ্ঞানে এক নূতন বিপ্লবের সৃষ্টি করল। প্রথম সিদ্ধান্ত হ'ল যে ইথারের অস্তিত্ব নেই, এই অর্থে যে এর ভিতর কোনও পর্য্যবেক্ষকের পক্ষে তার নিজস্ব কাঠামো স্থির অথবা গতিশীল তা নির্ণয় করার উপায় নেই, কারণ মাইকেলসন-মর্লির পরীক্ষা স্পষ্টই নির্দ্দেশ করে যে পরমগতি নির্দ্ধারণ করতে গেলেই এক অসাধ্য দ্বন্দ্বের সম্মুখীন হতে হয়। ইথারকে এক পরম কাঠামো হিসাবে কল্পনা করা হয়েছিল, সুতরাং এর অর্থ হ'ল যে জগতে কোন পরম কাঠামোর অস্তিত্ব নেই, সমস্ত কাঠামোই আপেক্ষিক। আইনস্টাইনের লক্ষ্য ছিল এমন একটি বলবিজ্ঞান সৃষ্টি করা যার ভিতর পরম কাঠামো বা পরম গতিবেগের ধারণা প্রবেশ করে না।

মাইকেলসন-মর্লির পরীক্ষায় আলোর গতির সঙ্গে তুলনা করে পৃথিবীর গতি নির্ণয় করার চেষ্টা হয়েছে, এই পরীক্ষার সম্পূর্ণ নেতিমূলক ফলাফল দেখে মনে হয় যে আলোর গতির মধ্যে এমন কোন বিশেষত্ব আছে যার ফলে এইরকম ঘটা সম্ভব হচ্ছে। আইনস্টাইন একটি প্রকল্প উত্থাপন করলেন যে, আলোর গতিবেগের পরিমিতি সবসময়ই ধ্রুব, তা পরীক্ষকের আপেক্ষিক গতি নিরপেক্ষ। ধরা যাক দুইজন পরীক্ষক, একজন অপরজনের তুলনায় v ধ্রুব আপেক্ষিক সরলরৈখিক গতিবেগে চলছে। 2·8 চিত্র অনুযায়ী প্রথমজন যে কাঠামোতে থেকে পরীক্ষা করছে, O, তার তুলনায় দ্বিতীয়জনের কাঠামো, O′, v গতিবেগে x-দিকে চলছে। আইনস্টাইনের প্রস্তাব অনুসারে O কাঠামোস্থ পরীক্ষক আলোর গতিবেগের যে সংখ্যাগত পরিমাণ (numerical value) নির্ধারণ করবে, O′ কাঠামোস্থ পরীক্ষকের দ্বারাও ঠিক ঐ একই পরিমাণ নির্দ্ধারিত হবে, অর্থাৎ এই পরিমাণ সব সময়ই একটি ধ্রুবক।

চিত্র 2·8

আইনস্টাইনের দ্বিতীয় প্রকল্প হ'ল এই যে, পদার্থবিজ্ঞানের যাবতীয় সূত্রাবলী কাঠামো নিরপেক্ষ, কোন একটি কাঠামোতে অবস্থিত একজন পরীক্ষকের নিকট পদার্থবিজ্ঞানের নিয়মাবলী যেরকম মনে হবে, ঐ কাঠামোর পরিপ্রেক্ষিতে ধ্রুব সরলরৈখিক গতিবেগে গমনশীল অপর একটি কাঠামোতে অপর একজন পরীক্ষকের কাছেও পদার্থজগতের নিয়মাবলী ঠিক একই রকম প্রতিভাত হবে। এই প্রযুক্তি অনুযায়ী কোন পরীক্ষক শুধু তার নিজস্ব কাঠামোর আপেক্ষিক গতিই মাপতে পারে, এর পরম গতি মাপা তার পক্ষে কখনই সম্ভব নয়। আপেক্ষিক গতি বলতে যেখানে শুধু সরলরেখায় ধ্রুব গতিবেগ বোঝায় সেই সব বিশেষ ক্ষেত্রের জন্য আপেক্ষিকতার নীতিকে বলা হয় আপেক্ষিকতার বিশেষ তত্ত্ব (Special theory of Relativity)। এই প্রকার তত্ত্বই পদার্থবিজ্ঞানে বর্ত্তমানে সর্ব্বাধিক ব্যবহৃত হয়।

এই দুই প্রকল্পের ভিত্তিতে আইনস্টাইন পদার্থবিজ্ঞানের যে নূতন তত্ত্ব গড়ে তুললেন তা শুধু যে বলবিজ্ঞানের ক্ষেত্রেই প্রযোজ্য এমন নয়, বিদ্যুৎচুম্বকীয় ঘটনাবলী, পারমাণবিক পদার্থবিজ্ঞান ইত্যাদি পদার্থবিজ্ঞানের সমস্ত শাখাতেই আপেক্ষিকতাতত্ত্বের প্রয়োগ হয়েছে। এর কারণ, উপরোক্ত প্রযুক্তি দুটি পদার্থবিজ্ঞানের যে কোন শাখার যাবতীয় সূত্রের ক্ষেত্রেই প্রযোজ্য। আইনস্টাইনই

সর্বপ্রথম নিউটনীয় বলবিজ্ঞানের সূত্রগুলি কাঠামোর গতিবেগ নিরপেক্ষভাবে উপস্থাপিত করলেন। কিন্তু আইনস্টাইনের পূর্বে ম্যাকসওয়েল বিদ্যুৎচুম্বকীয় তত্ত্বের যে সমীকরণগুলি লিখেছিলেন সেগুলি কাঠামো নিরপেক্ষ ছিল, এজন্য এদের পরিবর্তন করার কোন প্রয়োজন হয়নি।

আপেক্ষিকতার গাণিতিক তত্ত্ব কি এবং কিভাবে তা পদার্থবিজ্ঞানের বিভিন্ন শাখায় প্রযুক্ত হয় তা নিয়ে এই বইতে আমরা আলোচনা করব না। শুধু আপেক্ষিকতাতত্ত্বের কতগুলি ফলাফল বর্ণনা করা হবে এবং এই ফলাফল-গুলির সম্বন্ধে সঠিক ধারণা থাকাই বর্তমান বইতে আলোচ্য বিষয়বস্তুগুলি বুঝবার পক্ষে যথেষ্ট।

দেশ ও সময়ের আপেক্ষিকতা

আইনস্টাইনের আপেক্ষিকতাতত্ত্ব অনুসারে দেশ ও সময়ের ধারণা সম্পূর্ণ আপেক্ষিক, তা নির্ভর করে যে কাঠামোতে দেশ ও সময়ের পরিমাপ করা হচ্ছে তার আপেক্ষিক গতিবেগের উপর। 2·4 চিত্রে, O এবং O′ কাঠামোদ্বয়ে অবস্থিত দুইজন পরীক্ষক স্ব স্ব এবং অপরাপর কাঠামোতে সময় ও দৈর্ঘ্যের যে পরিমাপ করবে তা পরস্পরের থেকে অভিন্ন নয়, O কাঠামো থেকে দেখলে O′ কাঠামোতে গতিশীল একটি বস্তুর দৈর্ঘ্য গতিবেগের বরাবর সঙ্কুচিত হয়ে গেছে বলে মনে হবে, তেমনি O′ কাঠামোতে চলনশীল একটি ঘড়ির চলনকাল শ্লথ মনে হবে। এই প্রক্রিয়াটি অন্য সমস্ত কাঠামোতেই, যা O এর তুলনায় কোন নির্দিষ্ট আপেক্ষিক গতিবেগ নিয়ে চলছে, একইরকম প্রতিভাত হবে। আবার উল্টো করে বলা যায়, O′ কাঠামোতে অবস্থিত দর্শকের পক্ষে O কাঠামোতে অবস্থিত বস্তুর দৈর্ঘ্য সঙ্কুচিত এবং ঘড়ির চলনকাল শ্লথ মনে হবে। এথেকে বলা যায় যে কোন দর্শকের পক্ষে তার নিজস্ব কাঠামোতে কোন বস্তুর দৈর্ঘ্য সবচেয়ে বেশী এবং ঘড়ির চলনকাল দ্রুততম মনে হয়। দৈর্ঘ্যের পরিমাণ $\sqrt{(1-v^2/c^2)}$ এই অনুপাতে সঙ্কুচিত হয়ে থাকে, ঘড়ির চলনকালও ঠিক ঐ একই অনুপাতে শ্লথতর মনে হয়, এখানে c হ'ল শূন্যের ভিতর আলোর গতিবেগ। বাস্তবিকপক্ষে দৈর্ঘ্যের এই সঙ্কোচন এবং সময়ের শ্লথীভবন ঘটার জন্যই উভয় কাঠামোস্থ দর্শকের কাছে আলোর বেগের পরিমাণ অভিন্ন মনে হয়। দেশ ও সময়ের এই আপেক্ষিক প্রকৃতি আইনস্টাইনের উপরিলিখিত প্রকল্পদ্বয়ের সাহায্যে প্রমাণ করা যায়। আইনস্টাইনের পূর্বে লরেন্টজ এবং ফিটজেরাল্ড মাইকেলসন-মর্লি পরীক্ষাটি ব্যাখ্যা করার জন্য সর্বপ্রথম দৈর্ঘ্য সঙ্কোচনের প্রকল্পটি উত্থাপন করেন, এজন্য

এই সঙ্কোচনকে লরেণ্টজ্-ফিটজেরাল্ড সঙ্কোচন আখ্যা দেওয়া হয়ে থাকে। আইনস্টাইনের আপেক্ষিকতাতত্ত্ব অনুযায়ী সময় এবং দেশের কোন পরম পরিমাপ সম্ভব নয়, সমস্ত পরিমাপই আপেক্ষিক অর্থাৎ কাঠামোর আপেক্ষিক গতিবেগের উপর নির্ভরশীল। এই কারণে দেশ এবং সময়ের প্রকৃতিও আপেক্ষিক।

গতিবেগের সঙ্গে সঙ্গে ভরের পরিমাণ বৃদ্ধি

মনে করা যাক একটি কণার ভর m_0 যখন এই ভর এমনভাবে মাপা হয়েছে যাতে কণা ও পরীক্ষকের মধ্যে আপেক্ষিক গতিবেগ শূন্য অর্থাৎ কণাটি পরীক্ষকের কাঠামোতে স্থির। যদি এই কণাটি ধ্রুব গতিবেগ v নিয়ে চলতে থাকে তবে স্থির কাঠামোতে অবস্থিত দর্শকের নিকট এর ভরের পরিমাণ মনে হবে

$$m = m_0/(1 - v^2/c^2)^{\frac{1}{2}} \qquad \cdots \qquad \cdots \qquad 2{\cdot}29$$

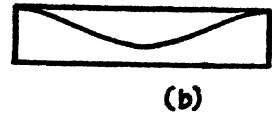
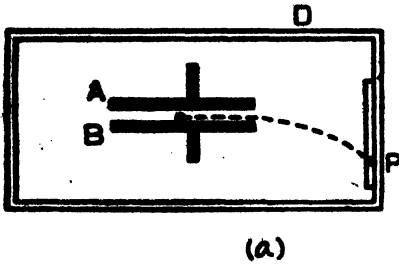
যেহেতু $v < c$, স্থির পরীক্ষকের নিকট মনে হবে কণাটির ভর বৃদ্ধি পেয়েছে। ইলেকট্রনের উপর পরীক্ষা করে এই সূত্রটির যথার্থতা প্রমাণিত হয়েছে, এই পরীক্ষাটি সম্বন্ধে পরবর্তী পরিচ্ছেদে বিশদভাবে আলোচনা করা হয়েছে। আমরা আগেই বলেছি যে ইলেকট্রনের e/m এর পরিমাণ এর গতিবেগের উপর নির্ভরশীল। যদি এই অনুপাত ইলেকট্রনের গতিবেগ v এর অপেক্ষক হিসাবে মাপা হতে থাকে তবে দেখা গেছে যখন v এর পরিমাণ বৃদ্ধি পেয়ে আলোর গতিবেগ c এর কাছাকাছি পৌঁছে যায়, তখন e/m এর পরিমাণ ক্রমশঃ হ্রাস পেতে থাকে। কিন্তু আপেক্ষিকতাতত্ত্ব অনুযায়ী আপেক্ষিক গতির সাথে সাথে ইলেকট্রনের আধান e এর কোন পরিবর্তন হয় না, সুতরাং এই পরীক্ষায় প্রমাণিত হয় যে, গতিবেগের সাথে সাথে ভরের পরিমাণ বৃদ্ধি পায়। পরীক্ষায় আরও প্রমাণিত হয়েছে যে ভরের পরিমাণ বৃদ্ধি ঠিক 2·29 সূত্র অনুযায়ীই হয়। তবে যখন $c \gg v$, তখন $m \simeq m_0$ অর্থাৎ স্থির বা গতিশীল উভয়ক্ষেত্রেই একই ভর নির্দ্ধারিত হবে। এখানে উল্লেখযোগ্য যে, এই ভরের পরিমাণ বৃদ্ধি সম্পূর্ণ আপেক্ষিক, যদি কোন পরীক্ষক v গতিবেগ নিয়ে কণাটির সাথে সাথে চলতে থাকে তবে তার নিকট কণাটির ভরের কোন বৃদ্ধি ঘটেছে বলে মনে হবে না।

2·29 সূত্রটি থেকে দেখা যায় যে যদি কখনও $v = c$ হয় তবে কণাটির ভর বৃদ্ধি পেয়ে অসীম হয়ে যাবে। কিন্তু অসীম ভর অকল্পনীয় সুতরাং এথেকে ধারণা করা যায় যে কোন বস্তুর গতিবেগ কখনই আলোর গতিবেগের সমান হতে পারে না। আলোর গতিবেগ হ'ল চরম গতিবেগ, এর সমান

গতিবেগ অর্জন করা কোন বস্তুর পক্ষেই সম্ভব নয়; এই সিদ্ধান্তটিও আইনস্টাইনের আপেক্ষিকতাতত্ত্বের একটি অন্যতম ফল।

বুখারার-এর (Bucherer) পরীক্ষা

পরীক্ষার সাহায্যে আইনস্টাইনের 2·29 সূত্রটির সত্যতা প্রমাণ করার জন্য বুখারার একটি অভিনব পরীক্ষার আয়োজন করেন, আয়োজনটি 2·9 (a) চিত্রে বর্ণনা করা হয়েছে। দুটি ৮ সেমি ব্যাসবিশিষ্ট কাঁচের পাত যাদের ভেতরের দিকটা রূপার প্রলেপ লাগান, পরস্পরের সঙ্গে $\frac{1}{4}$ মিলিমিটার ফাঁক করে বসান হয়েছে, ঐ ফাঁকের ভিতর এদের কেন্দ্রে সামান্য পরিমাণে বিটাক্ষরক তেজস্ক্রিয় পদার্থ রাখা হয়েছে। প্লেট দুটির মধ্যে বিভব ব্যবধান প্রয়োগ করে ফাঁকের মধ্যে বৈদ্যুতিক ক্ষেত্র সৃষ্টি করা হয়, তদুপরি একটি

চিত্র 2·9

(a) বুখারার-এর পরীক্ষার আয়োজনের প্রচ্ছেদ চিত্র। চিত্রস্থ বাক্সটির ভিতর সর্বত্রই পৃষ্ঠার সমতলের সঙ্গে লম্বভাবে চৌম্বকক্ষেত্র বজায় থাকে। A, B প্লেটদ্বয়ের অভ্যন্তরে চৌম্বকক্ষেত্রের সঙ্গে লম্বভাবে বৈদ্যুতিক ক্ষেত্র বর্তমান।
(b) ফোটোগ্রাফীর প্লেটের গায়ে বিটা কণার দ্বারা সৃষ্ট রেখা।

সমমাত্র চৌম্বকক্ষেত্র বৈদ্যুতিক ক্ষেত্রের সঙ্গে লম্বভাবে D প্রকোষ্ঠটির ভিতর সর্বত্র বর্তমান থাকে। এই প্লেট দুটিকে ঘিরে এবং এদের কিনারা থেকে 5 সেন্টিমিটার দূরে রয়েছে একটি বৃত্তাকার সিলিণ্ডার যার পরিধির উপর একটি ফোটোগ্রাফীর প্লেট লাগান আছে। তেজস্ক্রিয় বিটাক্ষরণশীল পদার্থের ভিতর থেকে বিভিন্ন গতিবেগে শক্তিশালী ইলেকট্রন নির্গত হয়ে আসে। (তেজস্ক্রিয়তার বিবরণ সপ্তম অধ্যায়ে বিস্তৃতভাবে দেওয়া হবে)। প্লেট দুটির মধ্যে ফাঁক এত কম এবং বৈদ্যুতিক ক্ষেত্রের তীব্রতা এত অধিক যে শুধুমাত্র বৈদ্যুতিক ক্ষেত্রের উপস্থিতি থাকলে ইলেকট্রনগুলি কিছুতেই প্লেট দুটির ভিতর থেকে বেরিয়ে আসতে পারবে না, প্লেটের গায়ে ধাক্কা লেগে নষ্ট হয়ে যাবে। যদি চৌম্বকক্ষেত্রের উপস্থিতি থাকে এবং তা কণাটির গতিপথের সমান্তরাল হয় তবে কণাটির উপর কোন চৌম্বক বল ক্রিয়া করবে না। ধরা যাক বিটাকণাগুলির উপর বৈদ্যুতিক বল

উপরের দিকে অর্থাৎ B→A দিকে ক্রিয়া করে। যে θ কোণে একটি ইলেকট্রন নির্গত হয়ে আসে তা যদি 0° থেকে 180° এর মধ্যে থাকে তবে ধরা যাক ঐ কণাগুলি চৌম্বকক্ষেত্রের প্রভাবে নীচের দিকে [অর্থাৎ A → B দিকে, চিত্র 2.9(a)] নামতে থাকবে। ঐ অবস্থায় তাহলে যেসব নির্গমন কোণ θ, 180° থেকে 360° এর মধ্যে থাকবে তাদের জন্য চৌম্বক বল B → A দিকে ক্রিয়া করবে। সুতরাং 180° থেকে 360° এর মধ্যে কোন কণাই প্লেট দুটির ভিতর থেকে বেরিয়ে আসতে পারবে না। একটি বিটা কণা যেটি ফাঁকের ভিতর প্লেট দুটির সঙ্গে সমান্তরালভাবে চলছে সেটি ফাঁকের ভিতর দিয়ে নির্গত হয়ে আসতে পারবে যদি এর গতিবেগ v এবং নির্গমন কোণ θ নিম্নলিখিত সম্বন্ধটি মেনে চলে

$$\frac{\mathrm{B}ev}{c}\sin\theta=\mathrm{E}e$$

অর্থাৎ
$$v=\frac{\mathrm{E}c}{\mathrm{B}\sin\theta} \quad \cdots \quad \cdots \quad 2{\cdot}30$$

এখানে B এবং E যথাক্রমে চৌম্বক ও বৈদ্যুতিক ক্ষেত্রের তীব্রতা। অর্থাৎ শুধু ঐ বিশেষ কোণ এবং বিশেষ গতিবেগের জন্যই চৌম্বক ও বৈদ্যুতিক ক্ষেত্রের প্রভাব পরস্পর সমান ও বিপরীতমুখী। প্লেট দুটির ভিতর থেকে নির্গত হবার পর আর বিটা কণাটির উপর কোন বৈদ্যুতিক বল ক্রিয়া করে না, বাকী পথ শুধু চৌম্বক বলের প্রভাবে একটি বৃত্তের চাপ বরাবর অগ্রসর হয়ে অবশেষে এটি সিলিণ্ডারের গায়ে লাগান ফোটোগ্রাফীর প্লেটে এসে আঘাত করে। কণাটি প্লেটের বাইরে যে বৃত্তাকার পথে অগ্রসর হয় তার বক্রতার ব্যাসার্দ্ধ নিম্নলিখিত সর্তের দ্বারা প্রদত্ত

$$\frac{\mathrm{B}ev\sin\theta}{c}=\frac{mv^2}{\mathrm{R}} \quad \cdots \quad \cdots \quad 2{\cdot}31$$

পরীক্ষার দ্বারা B, E, θ, R এবং 2·30 সর্ত থেকে v নির্ণয় করে তারপর 2·31 সমীকরণ প্রয়োগ করে e/m নির্ণয় করা যায়।

2.9(b) চিত্রটি বুখারার-এর পরীক্ষায় প্রাপ্ত একটি ফোটোগ্রাফের চিত্র, ফোটোগ্রাফীর প্লেটের উপর, কোন একটি বিশেষ কোণে যে দাগ সৃষ্টি হয় তা কোন বিশেষ গতিবেগের ইলেকট্রনের দ্বারাই শুধু সম্ভব। সুতরাং বোঝা যায় যে এই পরীক্ষায় e/m অনুপাতের পরিমাণ গতিবেগের অপেক্ষক হিসাবে নির্ণয় করা যায় এবং এই নির্ণয় একটিমাত্র ফোটোগ্রাফ থেকেই করা সম্ভব। বুখারার-এর পরীক্ষায় আলোর গতির নিকটবর্তী গতিবেগ সম্পন্ন

বিটা কণা ব্যবহার করা হয়েছিল, পরীক্ষা থেকে দেখা যায় যে e/m অনুপাতের মান গতিবেগের সাথে সাথে পরিবর্ত্তিত হচ্ছে। আইনস্টাইনের আপেক্ষিকতা-তত্ত্বে মোট বৈদ্যুতিক আধান e-এর মান গতিবেগ নিরপেক্ষ সুতরাং e/m-এর মান যে গতিবেগের উপর নির্ভরশীল তার একমাত্র কারণ গতিবেগের উপর ভর m-এর নির্ভরশীলতা যা 2·29 সূত্রের দ্বারা প্রকাশিত। অর্থাৎ

$$e/m = e/m_0 \times (1-v^2/c^2)^{\frac{1}{2}}$$

$$\frac{e}{m_0} = \frac{e/m}{(1-v^2/c^2)^{\frac{1}{2}}} = \text{ধ্রুবক} \quad \cdots \quad \cdots \quad 2\cdot32$$

এখানে m_0 ইলেকট্রনের স্থির ভর। সুতরাং পরীক্ষালব্ধ e/m-এর মানকে যদি $(1-v^2/c^2)^{\frac{1}{2}}$ দ্বারা ভাগ করা যায় তবে যে কোন গতিবেগেই তা হবে একটি ধ্রুবক, পরীক্ষায় প্রাপ্ত ফলাফল থেকে 2·32 সর্ত্তের সত্যতা প্রমাণিত হয়।

ভর ও শক্তির অভিন্নতা

আপেক্ষিকতাতত্ত্বের আরেকটি যুগান্তকারী ফলাফল হ'ল ভর ও শক্তির অভিন্নতার নীতি। আপেক্ষিকতাতত্ত্ব অনুসারে ভর ও শক্তি একই সত্তার দুটি পৃথক রূপ মাত্র এবং ভরকে শক্তিতে এবং শক্তিকে ভরে রূপান্তরিত করা যায়। এই তত্ত্ব থেকে ভর এবং শক্তির মধ্যে নিম্নলিখিত সম্বন্ধটি পাওয়া যায়

$$E = mc^2 \quad \cdots \quad \cdots \quad 2\cdot33$$

এখানে m হ'ল ভরের পরিমাণ এবং E, m পরিমাণ ভরের ভিতর নিহিত শক্তির পরিমাণ। m কে যদি গ্রামে প্রকাশ করা হয় এবং c, সেমি/সেকেণ্ড, তবে E-এর পরিমাণ প্রকাশিত হবে আর্গে। 2·33 সূত্রটি আধুনিক বিজ্ঞানে একটি যুগান্তকারী আবিষ্কার। বহুদিন থেকেই জানা ছিল যে আলো, তাপ ইত্যাদি শক্তি একই শক্তির বিভিন্ন বিকার মাত্র, কিন্তু পদার্থও যে শক্তির প্রকারান্তর মাত্র এই সত্যের অবতারণা হ'ল সর্ব্বপ্রথম আইনস্টাইনের আপেক্ষিকতাতত্ত্বে। 2·33 সমীকরণে প্রকাশিত তথ্যের প্রত্যক্ষ প্রমাণ লক্ষ্য করা যায় পরমাণু বোমার বিস্ফোরণে। এই বিস্ফোরণ কোন রাসায়নিক বিক্রিয়ার দ্বারা ঘটে না, এই বিস্ফোরণে ইউরেনিয়াম পরমাণুর ভরের কিছু অংশ শক্তিতে রূপান্তরিত হয় ঠিক উপরিলিখিত সূত্র অনুযায়ী। এক গ্রাম

ওজনের পদার্থ যদি শক্তিতে রূপান্তরিত হয়, তবে তাথেকে বিপুল পরিমাণে শক্তি নিঃসারিত হবে

$$E=1 \text{ গ্রাম } \times(3\times10^{10}\text{সেমি/সেকেণ্ড})^2=9\times10^{20} \text{ আর্গ}$$
$$=2{\cdot}14\times10^{13} \text{ ক্যালোরী}$$

এথেকে বোঝা যায় যে সামান্য পরিমাণ পদার্থ শক্তিতে রূপান্তরিত হলেও তার ফলে বিপুল পরিমাণ শক্তি উৎপন্ন হতে পারে।

2·33 সমীকরণে আবির্ভূত ভরের পরিমাণ m, 2·29 সূত্রের দ্বারা প্রকাশিত অর্থাৎ স্থির ভর অথবা আপেক্ষিক গতিতে চলনশীল অবস্থার ভর উভয় ক্ষেত্রেই এই সমীকরণটি প্রযোজ্য। যখন $v/c \ll 1$, তখন আমরা 2·29 সম্বন্ধটিকে একটি শ্রেণীতে সম্প্রসারণ করে লিখতে পারি

$$m=m_0(1-v^2/c^2)^{-\frac{1}{2}}=m_0+\tfrac{1}{2}m_0v^2/c^2+\cdots v/c \text{ এর উচ্চতর সূচকবিশিষ্ট রাশি।}$$

যদি v/c এর পরিমাণ 1 এর তুলনায় যথেষ্ট কম হয়, তবে আমরা বর্গ বাদে v/c এর অন্যান্য উচ্চতর সূচকগুলি অবহেলা করতে পারি। উপরের সমীকরণে ডানদিকের দ্বিতীয় রাশিটি হ'ল নিউটনীয় পদার্থবিজ্ঞান অনুযায়ী v গতিবেগ অবস্থায় m_0 ভরের গতিশক্তির পরিমাণ, c^2 দ্বারা বিভাজিত। সুতরাং যখন কোন একটি বস্তু বা কণা v গতিতে দর্শকের তুলনায় অগ্রসর হচ্ছে তখন এর জাড্যজনিত মোট ভরের পরিমাণ হ'ল দুটি রাশির সমষ্টি, এর স্থির ভর m_0 এবং এর নিউটনীয় গতিশক্তি$/c^2$। এথেকে প্রতীয়মান হয় যে, কোন কণার ভিতর গতিশক্তি সঞ্চারিত থাকলে এর মোট জাড্যজনিত ভরের পরিমাণও বৃদ্ধি পায় এবং বৃদ্ধির পরিমাণ ভর ও শক্তির পারস্পরিক সম্বন্ধ 2·33 সূত্রের দ্বারাই প্রকাশিত। 2·29, 2·33 সম্বন্ধদ্বয় ব্যবহার করে আমরা আপেক্ষিকতাতত্ত্বের প্রদত্ত গতিশক্তির জন্য লিখতে পারি

$$\text{গতিশক্তি}=(m-m_0)c^2=m_0c^2\left(\frac{1}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}-1\right)$$

$$=\tfrac{1}{2}m_0v^2 \text{ যখন } v/c \ll 1 \qquad \cdots \qquad \cdots \quad 2{\cdot}34$$

আপেক্ষিকতাতত্ত্বে ভরবেগ এবং বলের সংজ্ঞা নিম্নলিখিতভাবে লেখা হয়

$$\text{ভরবেগ}=p=mv=\frac{m_0}{\sqrt{1-v^2/c^2}}.v \qquad \cdots \qquad \cdots \quad 2{\cdot}35$$

$$\text{বল} = \frac{d}{dt}(mv) = m\frac{dv}{dt} + v\frac{dm}{dt}$$

$$= \frac{m_0}{\sqrt{1-v^2/c^2}}\frac{dv}{dt} + v\frac{dm}{dt} \qquad \cdots \quad 2{\cdot}36$$

[বস্তুতঃ 2·36 সম্বন্ধটিতে প্রদত্ত আপেক্ষিকতাতাত্ত্বিক বলের সূত্রটি প্রয়োগ করেও গতিশক্তি-নির্দ্ধারণ করা যায়, নিউটনীয় বলবিজ্ঞানে যেভাবে গতিশক্তি গণনা করা হয় এটি ঠিক তারই অনুরূপ। গতিশক্তির সামান্য বর্দ্ধন $d\text{T}$ এর জন্য আমরা লিখতে পারি

$$d\text{T} = \text{F}dx$$

এখানে F হ'ল আপেক্ষিকতাতাত্ত্বিক বল 2·36 সম্বন্ধ দ্বারা প্রকাশিত।
সুতরাং

$$d\text{T} = m\frac{dv}{dt}dx + v\frac{dm}{dt}dx$$

$$= m\frac{dx}{dt}\frac{dv}{dt}dt + v\frac{dx}{dt}\frac{dm}{dt}dt$$

$$= mvdv + v^2dm \qquad \cdots \qquad \cdots \quad 2{\cdot}37$$

এবার 2·29 সমীকরণটিকে অবকলন করলে আমরা পাই

$$dm = \frac{m_0}{c^2}\frac{vdv}{(1-v^2/c^2)^{\frac{3}{2}}} = \frac{mvdv}{c^2-v^2}$$

dm-এর এই মান 2·37 সমীকরণে প্রয়োগ করলে আমরা পাই

$$d\text{T} = \frac{m_0vdv}{(1-v^2/c^2)^{\frac{1}{2}}} + \frac{m_0v^3/c^2}{(1-v^2/c^2)^{\frac{3}{2}}}dv$$

$$= \frac{m_0vdv}{(1-v^2/c^2)^{\frac{3}{2}}}$$

এবার সমাকলন করলে গতিশক্তির মান নির্দ্দেশক প্রকাশনটি পাওয়া যায়

$$\text{T} = \int_0^T d\text{T} = \int_0^v \frac{m_0\,vdv}{(1-v^2/c^2)^{\frac{3}{2}}} = m_0c^2\left\{\frac{1}{(1-v^2/c^2)^{\frac{1}{2}}} - 1\right\}$$

$$= mc^2 - m_0c^2 \qquad \cdots \qquad \cdots \qquad \cdots \quad 2{\cdot}38$$

গতিশক্তির এই মান 2·34 সম্বন্ধের সঙ্গে অভিন্ন।]

এছাড়া উপরিলিখিত বিভিন্ন সম্বন্ধগুলির সাহায্যে, মোট শক্তি, ভরবেগ এবং স্থির ভরের ভিতর একটি খুব প্রয়োজনীয় সম্বন্ধ স্থাপন করা যায়।

E যদি একটি কণার মোট শক্তি অর্থাৎ এর স্থির শক্তি এবং গতিশক্তির সমাহার হয় তবে 2·33 সূত্র থেকে আমরা পাই

$$\frac{E^2}{m_0^2c^4}=\frac{m^2c^4}{m_0^2c^4}=\frac{m^2}{m_0^2}=\frac{1}{1-v^2/c^2}$$

এবার 2·35 সম্বন্ধটি থেকে

$$1+\left(\frac{p}{m_0c}\right)^2=1+\frac{v^2/c^2}{1-v^2/c^2}=\frac{1}{1-v^2/c^2}=\frac{E^2}{m_0^2c^4}$$

সুতরাং

$$E^2=m_0^2c^4+p^2c^2 \quad \cdots \quad \cdots \quad 2·39$$

আপেক্ষিকতাতত্ত্বের এইসব সম্বন্ধগুলি পরবর্ত্তী অধ্যায়গুলিতে বিভিন্ন ক্ষেত্রে বহুবার প্রযুক্ত হবে। যখনই একটি কণা অতিরিক্ত শক্তি অর্জ্জন করে অর্থাৎ এর গতিবেগ আলোর গতিবেগের নিকটবর্ত্তী হয়, তখনই আপেক্ষিকতাতত্ত্বের সম্বন্ধগুলির প্রয়োগ অনিবার্য্য হয়ে পড়ে। বিশেষ করে 2·29 ও 2·33 সম্বন্ধদ্বয়ের প্রয়োগ ব্যতীত পরমাণু ও কেন্দ্রীনের ধর্ম্মাবলী আলোচনা করা একরকম অসম্ভব। তবে যখন $v/c \ll 1$, তখন সাধারণতঃ আপেক্ষিকতাতাত্ত্বিক সূত্রগুলি নিউটনীয় বলবিজ্ঞানের সূত্রে পর্য্যবসিত হয়। এখানে উল্লেখযোগ্য যে, রাসায়নিক বিক্রিয়ায় যে শক্তি উৎপন্ন হয় সেখানেও ভর ও শক্তির সম্বন্ধসূচক সমীকরণটি প্রয়োগ করা যায়, তবে সাধারণতঃ রাসায়নিক বিক্রিয়াজাত শক্তির তুল্য ভরের পরিমাণ বিক্রিয়াশীল অণুপরমাণুগুলির ভরের 10^{-9} অংশ মাত্র কিংবা এরও কম হয়, এজন্য অণুগুলির ভরের যে পরিবর্ত্তন হয় তা নির্ণয় করা দুঃসাধ্য। এজন্যই লাভোয়াসিয়রের পরীক্ষায় রাসায়নিক বিক্রিয়ায় অংশগ্রহণকারী বিক্রিয়াশীল ও বিক্রিয়াজাত পদার্থগুলির ওজনের কোন তারতম্য লক্ষিত হয়নি। কিন্তু পরমাণুকেন্দ্রীনঘটিত বিক্রিয়ায় যে শক্তি নিঃসারিত হয় বা শোষিত হয় তা প্রায়শঃই পরমাণুগুলির স্থির শক্তির তুলনীয় পরিমাণের হয়ে থাকে এজন্য ঐসব ক্ষেত্রে ওজনের তারতম্য লক্ষ্য করা অপেক্ষাকৃত সহজ। ঐসব বিক্রিয়াগুলির নিদর্শন পরবর্ত্তী অধ্যায়গুলিতে দেওয়া হবে, এদের উপর পরীক্ষা করে 2·33 সূত্রটির নির্ভুলতা অবিসংবাদিতভাবে প্রমাণ করা সম্ভব হয়েছে।

গতিবেগের যোগফল

যদি u এবং v এই দুই গতিবেগ একই দিকে থাকে তবে এদের যৌগফল আপেক্ষিকতাতত্ত্ব অনুযায়ী নিম্নরূপ হবে

$$w=\frac{u+v}{1+uv/c^2} \quad \cdots \quad \cdots \quad 2·40$$

ব্যাখ্যা করা যেতে পারে যে এই যোগফলের সূত্র অনুযায়ী যেকোন দুইটি গতিবেগের যোগফল কখনই আলোর গতিবেগ c এর সমান হতে পারে না। ধরা যাক একটি গতিবেগ $0{\cdot}9c$ এবং অপরটিও $0{\cdot}9c$, এদের যোগফল

$$w = \frac{0{\cdot}9c + 0{\cdot}9c}{1 + \frac{0{\cdot}9 \times 0{\cdot}9c^2}{c^2}} = \frac{1{\cdot}8c}{1{\cdot}81} < c$$

সুতরাং এথেকেও দেখা যায় যে, আলোর গতিবেগের চেয়ে অধিক গতিবেগ কখনই সম্ভব নয়। যখন $c^2 \gg uv$ এখন আমরা সনাতন গতিবেগ যোগকরণের সূত্রটি ফিরে পাই।

পরমাণু বিজ্ঞানে শক্তির একক

পরমাণু বিজ্ঞানে শক্তি ও ভরের কতগুলি নূতন একক ব্যবহার করা হয় এবং যেহেতু এই বইতে সর্ব্বত্র ঐ এককগুলিই ব্যবহার করা হবে এদের সংক্ষিপ্ত বিবরণ দেওয়া প্রয়োজন। প্রথম অধ্যায়ে আমরা উল্লেখ করেছিলাম যে রসায়নবিজ্ঞানে পারমাণবিক ওজনের মানক হিসাবে অক্সিজেন পরমাণুর ওজন ধরা হয় 16, কিন্তু প্রকৃতিজাত অক্সিজেনের ভিতর বিভিন্ন অনুপাতে একাধিক আইসোটোপ মিশ্রিত থাকায় এইভাবে আপেক্ষিক ওজন নির্দ্ধারণে অনেক সময় বিশেষ অসুবিধার সৃষ্টি হয়। এই কারণে পদার্থবিজ্ঞানে সাধারণতঃ বিশেষ কোন একটি আইসোটোপের ওজনকে পারমাণবিক ওজনের মানক হিসাবে ধরা হয়। এরকম দুটি মানক প্রচলিত আছে, একটিতে অক্সিজেনের একটি আইসোটোপ O^{16} এর পারমাণবিক ওজন $16{\cdot}000\cdots$ ধরা হয়, সুতরাং তখন ভরের একক হয় O^{16}† পরমাণুর ওজনের 16 ভাগের 1 ভাগ। কিন্তু সম্প্রতি পদার্থবিদ ও রসায়নবিদগণ উভয়েই কার্ব্বনের একটি আইসোটোপ C^{12}কে মানক হিসাবে স্বীকার করে নিয়েছেন, এই নূতন মানকে C^{12} পরমাণুর আপেক্ষিক ওজন $12{\cdot}00000\cdots$ এবং পারমাণবিক ওজনের একক হ'ল C^{12} পরমাণুর ওজনের $\frac{1}{12}$ অংশ। তবে এই বইতে আমরা O^{16} মানকটিই সর্ব্বত্র ব্যবহার করব।

O^{16} মানক অনুযায়ী প্রোটনের পারমাণবিক ওজন $1{\cdot}00759$। ভর মাপনীর সাহায্যে অথবা বর্ণালী বিশ্লেষণ করে প্রোটনের প্রকৃত ওজনও মাপা যায় এবং এর পরিমাণ

$$\therefore \quad M_p = 1{\cdot}6725 \times 10^{-24} \text{ গ্রাম}$$

সুতরাং এথেকে আমরা পাই

---

† O^{16} সূচকটি অক্সিজেন আইসোটোপের সূচক। পরবর্তী একটি অধ্যায়ে আইসোটোপের এই চিহ্নীকরণ ব্যাখ্যা করা হয়েছে।

$$1 \text{ পারমাণবিক ভর একক (এএমইউ)} = \frac{1.6725 \times 10^{-24}}{1.0072}$$
$$= 1.6599 \times 10^{-24} \text{ গ্রাম}$$

এবং আইনস্টাইনের সূত্র থেকে 1 এএমইউ স্থির ভরের জন্য

$$E = Mc^2 = 1.66 \times 10^{-24} \times (2.998 \times 10^{10})^2 \text{ আর্গ}$$
$$= 14.92 \times 10^{-4} \text{ আর্গ}$$

O^{16} মানক অনুসারে কতগুলি আইসোটোপের পারমাণবিক ওজনের একটি তালিকা পরিশিষ্টের ভিতর দেওয়া হয়েছে। পরমাণু বিজ্ঞানে শক্তির একক হ'ল ইলেকট্রন ভোল্ট বা সংক্ষেপে ইভি, এক ইলেকট্রন ভোল্ট বলতে বোঝায় একটি ইলেকট্রন এক ভোল্ট বিভব ব্যবধানের মধ্য দিয়ে ত্বরিত হলে যতটা শক্তি অর্জন করবে তার পরিমাণ

$$1 \text{ ইভি} = 4.806 \times 10^{-10} \times \tfrac{1}{300} \text{ আর্গ} = 1.602 \times 10^{-12} \text{ আর্গ}$$

অন্য কতগুলি একক, এগুলি প্রত্যেকটিই এক ইভির গুণিতক, এদেরও বহুল ব্যবহার আছে

$$1 \text{ কিলো ইভি} = 10^3 \text{ ইভি}$$
$$1 \text{ মিলিয়ন ইভি} = 1 \text{ এমইভি} = 10^6 \text{ ইভি}$$
$$1 \text{ বিলিয়ন ইভি} = 1 \text{ বিইভি} = 10^9 \text{ ইভি}$$

পারমাণবিক ভর ইলেকট্রন ভোল্টেও প্রকাশ করা যায়

$$1 \text{ পারমাণবিক ভর একক} = \frac{1.492 \times 10^{-3}}{1.602 \times 10^{-12}} = 931.3 \text{ এমইভি}$$

এই এককগুলির সাহায্যে ইলেকট্রনের স্থির শক্তির পরিমাণ গণনা করলে আমরা পাই

$$m_0 c^2 \text{ আর্গ} = \frac{9.109 \times 10^{-28} \times (3.0 \times 10^{10})^2}{1.602 \times 10^{-12}} \text{ ইভি}$$
$$= 0.51 \text{ এমইভি}$$

পরমাণুর পরম ভর নির্দ্ধারিত হলে তারপর তাথেকে এ্যাভোগাড্রো সংখ্যা নির্দ্ধারণ করা যায়। যেহেতু 1 এএমইউ $= 1.66 \times 10^{-24}$ গ্রাম এবং একটি অক্সিজেন অণুর ভর 32 এএমইউ, এক গ্রাম অণু অক্সিজেনের মধ্যে মোট পরমাণুর সংখ্যা হবে

$$N_0 = \frac{1}{1.66 \times 10^{-24}} = 6.024 \times 10^{23}$$ প্রতি গ্রাম-অণু

উদাহরণ

20 এমইভি ইলেকট্রন ও প্রোটনের ক্ষেত্রে আপেক্ষিকতাভিত্তিক ভর এদের স্থির ভরের তুলনায় কতগুণ বেশী হবে ?

সমাধান : আপেক্ষিকতাভিত্তিক ভরের সমীকরণ হ'ল

$$M = \frac{M_0}{\sqrt{1-(v/c)^2}} = \gamma M_0$$

উভয় দিককে c^2 দ্বারা গুণ করলে,

$$E = Mc^2 = \gamma M_0 c^2 = \gamma E_0$$

এখানে E_0 ও E যথাক্রমে স্থিরশক্তি ও আপেক্ষিকতাভিত্তিক শক্তি, কিন্তু

$$E = T + E_0 = \gamma E_0$$

সুতরাং, $$\gamma = \frac{E_0 + T}{E_0}$$

T, কণাটির গতিশক্তি ।

20 এমইভি প্রোটনের ক্ষেত্রে ($M_p = 938$ এমইভি)

$$\gamma = \frac{938+20}{938} = 1.0214$$

$$M = \gamma M_0 = 1.0214\ M_0$$

20 এমইভি ইলেকট্রনের ক্ষেত্রে

$$\gamma = \frac{0.511+20}{0.511} = 40.1$$

$$M = 40.1 M_0$$

সুতরাং প্রোটনের ক্ষেত্রে ভরের বৃদ্ধি মাত্র 0·0214 প্রোটনভর অর্থাৎ প্রায় 2%, কিন্তু ইলেকট্রনের ক্ষেত্রে বৃদ্ধি ঘটে এর ভরের 40 গুণের বেশী ।

প্রশ্নমালা

(1) একটি ভর-বর্ণালী মাপনীর ভিতর একবার আহিত একটি আয়ন ($q = 1.602 \times 10^{-20}$ বিদ্যুৎচুম্বকীয় একক) 1000 ভোল্টের বিভব ব্যবধানে ত্বরিত হচ্ছে। তারপর এটি একটি সমমাত্র চৌম্বকক্ষেত্রে ভ্রমণ করে যায়

তীব্রতা [illegible] = 1000 গস এবং ফলে আয়নটি একটি 18·2 সেমি ব্যাসার্দ্ধ সমবিভাজকরেখার পথে ভ্রমণ করে। আয়নটির গতিবেগ কত ?

[$1{\cdot}099\times10^7$ সেমি/সেক]

(2) একটি ইলেকট্রনকে 10^6 ভোল্ট বিভব ব্যবধানে ত্বরিত করলে এর ভর কি অনুপাতে বৃদ্ধি পাবে ? [$m/m_0=2{\cdot}96$]

(3) প্রোটনকে যথাক্রমে 20 এমইভি, 400 এমইভি এবং 2·5 বিইভি শক্তিতে ত্বরিত করা হয়েছে। ঐসব শক্তিতে এর গতিবেগ কত হবে ?

[$v/c=0{\cdot}2,\ 0{\cdot}713,\ 0{\cdot}962$]

(4) দেখাও যে আপেক্ষিকতাতাত্ত্বিক গতিশক্তির পরিমাণ নিম্নলিখিত উপায়ে প্রকাশ করা যেতে পারে

$$T=[(m_0c^2)^2+(pc)^2]^{\frac{1}{2}}-m_0c^2$$

এখানে p = ভরবেগ।

(5) দেখাও যে আপেক্ষিকতাতাত্ত্বিক ভরবেগ নিম্নলিখিত উপায়ে প্রকাশ করা যেতে পারে

$$p=\frac{1}{c}\left(T^2+2m_0c^2T\right)^{\frac{1}{2}}.$$

(6) একটি ইলেকট্রনপ্রবাহের ভিতর কণাগুলির গতিবেগ 2×10^9 সেমি/সেক। প্রবাহটি একটি ধ্রুব বৈদ্যুতিক ক্ষেত্রে প্রবেশ করে যার তীব্রতার পরিমাণ 100 ভোল্ট/সেমি এবং ক্ষেত্রটি আছে গতিবেগের দিকের সঙ্গে লম্বভাবে। যদি ইলেকট্রনগুলি নিজস্ব গতিবেগের দিকে 5 সেমি অগ্রসর হয় তবে ধারাটি লম্বভাবে কতটা বিচ্যুত হবে ? [0·55 সেমি]

(7) একটি তেলবিন্দুর ব্যাসার্দ্ধ 6×10^{-5} সেমি এবং তেলের ঘনত্ব 0·851 গ্রাম/সিসি। এটি 23°c তাপমাত্রা এবং 76 সেমি পারদের চাপবিশিষ্ট বাতাসের মধ্য দিয়ে আপনাআপনি নামতে থাকে এবং ঐ অবস্থায় বাতাসের সান্দ্রতার সহগের পরিমাণ $1{\cdot}823\times10^{-4}$ সি জি এস একক। অশুদ্ধীকৃত স্টোকস সূত্র প্রয়োগ করে ফোঁটাটি যে গতিবেগ নিয়ে নামছে তা নির্ণয় কর। [$3{\cdot}64\times10^{-3}$ সেমি/সেক]

(8) ধরা যাক পূর্ববর্ত্তী পরীক্ষায় তেলের ফোঁটাটি আরও অনেক বড়, ধরা যাক এর ব্যাসার্দ্ধ 0·01 সেমি কিন্তু অন্যান্য আর সমস্ত রাশিগুলিই অভিন্ন রয়েছে। এবার ফোঁটাটি কি গতিবেগ নিয়ে নামতে থাকবে ?

[101 সেমি/সেক]

(9) একটি ক্যাথোড টিউবের ভিতর ইলেকট্রনগুলিকে 6000 ভোল্ট বিভব ব্যবধানে ত্বরিত করা হচ্ছে। এই ইলেকট্রনের ধারাটিকে এরপর দুটি প্লেটের ভিতর দিয়ে চালিত করা হয় যেগুলি 3 সেমি লম্বা এবং 1·5 সেমি ফাঁক এদের মধ্যে রয়েছে। প্লেটের ঠিক শেষপ্রান্তে এসে ধারাটির কত বিচ্যুতি হবে যদি প্লেটদ্বয়ের ভিতর 1200 ভোল্ট বিভব ব্যবধান প্রয়োগ করা যায়? প্লেটের কিনারা থেকে 20 সেমি দূরে যদি একটি দীপনশীল পর্দা রাখা যায় তাহলে ঐ পর্দার উপর কতটা বিচ্যুতি লক্ষিত হবে?

[0·3 সেমি, 4·3 সেমি]

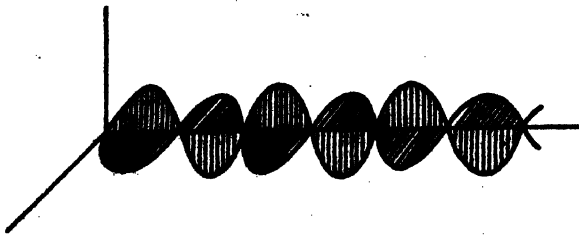
(10) দুটি সমান্তরাল প্লেট শূন্যের ভিতর 1·5 সেমি দূরত্বে অবস্থিত এবং একটি প্লেট একটি 1200 ভোল্ট বিভব উৎসের সঙ্গে যুক্ত; অপরটি ভূমিগ্রস্ত। প্লেটদ্বয়ের মধ্যে বৈদ্যুতিক ক্ষেত্রের তীব্রতা কত? এদের মধ্যে একটি ইলেকট্রন থাকলে তার উপর কত বল ক্রিয়া করবে? একটি প্লেট থেকে অপর প্লেটটিতে ভ্রমণ করতে ইলেকট্রনটি কত সময় নেবে?

[2·66 স্থির বৈদ্যুতিক একক/সেমি, $1{\cdot}28 \times 10^{-9}$ ডাইন, $1{\cdot}46 \times 10^{-9}$ সেকেণ্ড]

(11) একটি দুইবার আহিত U^{235} আয়নের ধারাকে 30,000 ভোল্ট বিভব ব্যবধানে ত্বরিত করা হয়েছে এবং তারপর এটিকে 15,000 গস সমমাত্র চৌম্বকক্ষেত্রে প্রবেশ করান হয়েছে। সেখানে এই আয়নের ধারাটির বক্রতার ব্যাসার্দ্ধ কত হবে? [18 সেমি]

তৃতীয় অধ্যায়

আলোকতরঙ্গ

আলোকশক্তি যে তরঙ্গাকারে প্রবাহিত হয় এই ধারণা সুপ্রাচীন, নিউটনের সমসাময়িক বিজ্ঞানী হায়গেন্স (Huygens) তাত্ত্বিক বিশ্লেষণের সাহায্যে আলোর তরঙ্গধর্ম্মের ধারণা সুপ্রতিষ্ঠিত করেন। তরঙ্গধর্ম্ম ও ব্যতিচার প্রক্রিয়া পরস্পরের সঙ্গে অঙ্গাঙ্গিভাবে জড়িত, আলোকতরঙ্গ, শব্দতরঙ্গ ইত্যাদি প্রত্যেক প্রকারের তরঙ্গই ব্যতিচার ক্রিয়ার সৃষ্টি করে থাকে, আলোর ব্যতিচারের নিদর্শন একটু পরেই দেওয়া হবে। তরঙ্গপ্রবাহের জন্য সাধারণতঃ কোন প্রকার মাধ্যমের প্রয়োজন হয় যার ভিতর দিয়ে ঐ বিশেষ ধরণের তরঙ্গ প্রবাহিত হতে পারে। যেমন, আমরা জানি যে বায়ু, জল, কঠিন পদার্থ ইত্যাদি কোন প্রকারের মাধ্যমের উপস্থিতি না থাকলে শব্দতরঙ্গের প্রবাহ সম্ভব নয়। ম্যাকসওয়েল কল্পনা করেছিলেন যে ইথার নামক একটি সর্ব্বব্যাপী মাধ্যমের উপস্থিতি আছে যার ভিতর দিয়ে আলোর প্রবাহ ঘটে। কিন্তু মাইকেলসন-মর্লির পরীক্ষার পর এই ইথারের ধারণা বিসর্জ্জন দিতে হয়েছে, তার কারণ পূর্ব্ববর্ত্তী অধ্যায়ে দেখান হয়েছে যে এই পরীক্ষা থেকে নিশ্চিতরূপে প্রমাণ হয় যে ইথার বা ঐজাতীয় কোন পরম কাঠামো বা মাধ্যমের উপস্থিতি জগতে নেই যার পরিপ্রেক্ষিতে আলোর একটি সার্ব্বিক পরম বেগ নির্দ্দেশ করা যায়। আলোর সম্বন্ধে আধুনিক প্রচলিত তত্ত্বের স্রষ্টা ম্যাকসওয়েল, এই তত্ত্বানুসারে আলো তাড়িৎচুম্বকীয় আলোড়নের প্রবাহ,

চিত্র 3·1

চিত্রে দুই পরস্পর উলম্ব সমতলে দুই তরঙ্গ আলোর প্রবাহের ভিতর বৈদ্যুতিক ও চৌম্বকক্ষেত্রের স্পন্দনকে নির্দ্দেশ করে।

এই আলোড়ন হ'ল বৈদ্যুতিক ও চৌম্বকক্ষেত্রের স্পন্দন যা আলোর গতিবেগে শূন্যের ভিতর দিয়ে প্রবাহিত হয়ে যায়। স্পন্দনশীল বৈদ্যুতিক ও চৌম্বক-ক্ষেত্র তাড়িৎচুম্বকীয় শক্তি বহন করে এবং একেই আলোকশক্তি আখ্যা দেওয়া

হয়। 3·1 চিত্রে এই তত্ত্ব অনুসারে আলোকতরঙ্গের প্রকৃতি কি তা দেখান হয়েছে ; আলো যেদিকে প্রবাহিত হয় সেই দিকের সঙ্গে লম্বভাবে বৈদ্যুতিক ও চৌম্বকক্ষেত্রের স্পন্দন ঘটে এবং চৌম্বকক্ষেত্রটি যে সমতলে থাকে তার সঙ্গে লম্বভাবে অবস্থিত অপর একটি সমতলে বৈদ্যুতিকক্ষেত্র বিরাজ করে। স্ব স্ব সমতলে বৈদ্যুতিক ও চৌম্বকক্ষেত্র সবসময়ই স্পন্দিত হচ্ছে এবং এই স্পন্দনের আলোড়ন ধ্রুব-c গতিবেগে শূন্যের ভিতর দিয়ে প্রবাহিত হয়ে যায়। শুধুমাত্র ইলেকট্রনিক যন্ত্রের সাহায্যে যেভাবে রেডিও ও রাডারতরঙ্গ উৎপন্ন করা হয় তাথেকে ম্যাকসওয়েলের তত্ত্বের যথার্থতা প্রতিপন্ন হয়।

$+x$ দিকে প্রবাহমান একটি তরঙ্গকে গাণিতিক সমীকরণের মাধ্যমে নিম্নলিখিত উপায়ে উপস্থাপিত করা যায়

$$y = A \sin 2\pi(t/T - x/\lambda) \quad \cdots \quad \cdots \quad 3·1$$

এখানে t এবং x যথাক্রমে সময় ও দূরত্ব, T-কে বলা হয় সময়অন্তর এবং λ হল তরঙ্গদৈর্ঘ্য, এই তরঙ্গের গতিবেগ হবে

$$v = \nu\lambda = \lambda/T \quad \cdots \quad \cdots \quad 3·2$$

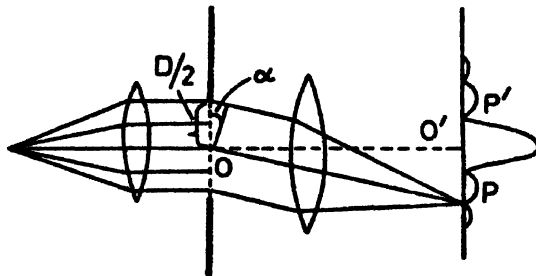
এখানে ν, তরঙ্গটির স্পন্দনাঙ্ক। y-কে বলা হয় সরণ, আলোর ক্ষেত্রে সরণ সবসময় প্রবাহপথের সঙ্গে লম্বভাবে ঘটে। A সরণের চরম পরিমাণ, একে তরঙ্গবিস্তার বা সংক্ষেপে বিস্তার নামে অভিহিত করা হয়। একটি তরঙ্গকে আরও সাধারণভাবে নিম্নলিখিত উপায়ে উপস্থাপিত করা যায়

$$y = A \sin(\omega t - kx + \theta) = A \sin\phi$$

এখানে $\omega = 2\pi\nu$ এবং $k = 2\pi/\lambda$। $\phi = (\omega t - kx + \theta)$, একে বলা হয় তরঙ্গের দশা। এই দশা x এবং t উভয়েরই অপেক্ষক, যখনই t এর T পরিমাণ বৃদ্ধি ঘটে অথবা x এর λ পরিমাণ বৃদ্ধি ঘটে তখনই তরঙ্গের দশা 2π পরিমাণে বৃদ্ধিপ্রাপ্ত হয়। দশা ϕ যখন 2π পরিমাণে বর্দ্ধিত হয় তখন সমস্ত ত্রিকোণমিতির অপেক্ষকগুলি যাদের দ্বারা y এর সংজ্ঞা দেওয়া হয় সেগুলি এদের পূর্ববর্তী মানে ফিরে আসে। θ রাশিটি $x=0, t=0$ অবস্থায় তরঙ্গটি কি দশায় আছে তা নির্দেশ করে। দুটি আলোকতরঙ্গ যাদের বিস্তার ও তরঙ্গদৈর্ঘ্য পরস্পর সমান এরা যদি একটি বিন্দুতে এসে এমনভাবে মিলিত হয় যে এদের মধ্যে দশার পার্থক্য থাকে π তবে এরা পরস্পর পরস্পরের প্রভাবকে সম্পূর্ণ খর্ব করে ফেলবে এবং সেই বিন্দুতে বিস্তারের পরিমাণ হবে শূন্য। এই বিন্দুটি একটি পর্দার উপর থাকলে সেখানে কোন আলো পরিলক্ষিত হবে না। কোন বিন্দুতে আলোর তীব্রতার পরিমাণ সেই বিন্দুতে আলোকতরঙ্গের বিস্তারের বর্গের সমানুপাতী

$$I \propto |A|^2$$

যদি তরঙ্গদ্বয় এমনভাবে মিলিত হয় যে এদের মধ্যে দশার পার্থক্য হয় 0 অথবা $2n\pi$ (n একটি অখণ্ড সংখ্যা) তবে সেখানে মোট বিস্তারের পরিমাণ হবে এদের বিস্তারদ্বয়ের যোগফলের সমান অর্থাৎ সেই বিন্দুতে আলোর তীব্রতার পরিমাণ একটি মাত্র তরঙ্গের দ্বারা সৃষ্ট তীব্রতার তুলনায় চারগুণ বেশী হবে। দুটি আলোকতরঙ্গকে একই বিন্দুতে মিলিত করে (সাধারণতঃ একটি পর্দায় অথবা ফোটোগ্রাফীর প্লেটের উপর) আলোর তীব্রতার হ্রাসবৃদ্ধি ঘটানর পরীক্ষাকে বলা হয় ব্যতিচার। নানাভাবে ব্যতিচার ক্রিয়া লক্ষ্য করা যায়। বিন্দুপ্রমাণ কিংবা রেখাপ্রমাণ আলোর উৎসের দ্বারা যে ব্যতিচার ঘটে ইংরেজীতে তাকে বলা হয় ইন্‌টারফিয়ারেন্স (Interference)। তবে বিস্তৃত অর্থাৎ নির্দিষ্ট আয়তনবিশিষ্ট উৎসের সাহায্যেও ব্যতিচার ক্রিয়া ঘটতে পারে, ইংরেজীতে এই ধরণের ব্যতিচারকে বলা হয় ডিফ্রাকশন (Diffraction), আমরা অবশ্য উভয় ক্ষেত্রেই শুধু ব্যতিচার কথাটিই ব্যবহার করব।

এই দ্বিতীয় ধরণের ব্যতিচারের একটি নিদর্শন হ'ল একটিমাত্র ফাঁকের ভিতর দিয়ে প্রবাহিত আলোর ব্যতিচার। 3·2 চিত্রের সাহায্যে এই ব্যতিচার ক্রিয়াটি বোঝান হয়েছে। এক্ষেত্রে দুটি তরঙ্গ যাদের একটি ফাঁকের ঠিক উপরের কিনারার বিন্দু থেকে উৎপন্ন হচ্ছে এবং অপরটি ফাঁকের মধ্যবিন্দুর ঠিক নীচের পরবর্তী বিন্দু থেকে উৎপন্ন হচ্ছে এবং উভয়ই OO' রেখার সঙ্গে নির্দিষ্ট α কোণে অগ্রসর হচ্ছে, এরা একটি আতসের ভিতর দিয়ে

চিত্র 3·2
একটি ফাঁকের দ্বারা সৃষ্ট সমান্তরাল আলোকরশ্মির ব্যতিচার।

প্রতিসরিত হয়ে P বিন্দুতে এসে মিলিত হয় এবং এদের মধ্যে পথের ব্যবধান হয় $D/2 \sin \alpha$। ছবিতে দেখা যাচ্ছে যে আলোকতরঙ্গগুলি যখন ফাঁকের ভিতর এসে পৌঁছায় তখন এরা একই দশায় থাকে সুতরাং ফাঁকের সমতলের সঙ্গে লম্বভাবে উৎপন্ন পরস্পর সমান্তরাল যে রশ্মিগুলি O' বিন্দুতে এসে মিলিত হয় সেগুলিও ঐ একই দশায় থাকে এবং সমধারণধর্মী ব্যতিচারের

সৃষ্টি করে। পূর্বোল্লিখিত যে দুটি রশ্মি P বিন্দুতে এসে মিলিত হয় তারা ধ্বংসাত্মক ব্যাতিচারের সৃষ্টি করবে যদি নিম্নলিখিত সর্তটি পালিত হয়

$$\frac{D}{2}\sin\alpha=\frac{\lambda}{2} \qquad \cdots \qquad \cdots\ 3\cdot3$$

অর্থাৎ যখন রশ্মিদ্বয়ের পথের ব্যবধান (দশার ব্যবধান π) অর্দ্ধ তরঙ্গদৈর্ঘ্য পরিমাণের হয়ে থাকে। 3·2 চিত্র থেকে প্রতীয়মান হয় যে পরস্পর সমান্তরাল রশ্মিগুলির ক্ষেত্রে ফাঁকের উপরার্দ্ধের প্রতিটি বিন্দুর জন্য নীচের অর্দ্ধে অপর একটি বিন্দু থাকে যা থেকে উপরোক্ত সর্তটি প্রতিপালিত হবে অর্থাৎ ঐ বিন্দুদ্বয় থেকে আগত রশ্মিগুলি P বিন্দুতে পরস্পরের সঙ্গে ধ্বংসাত্মক ব্যাতিচারের সৃষ্টি করবে। একটি ফাঁকের ভিতর দিয়ে প্রবাহিত সমান্তরাল রশ্মিগুলির দ্বারা সৃষ্ট ধ্বংসাত্মক ব্যাতিচারের সর্ত নিম্নলিখিত সাধারণ সূত্রের দ্বারা প্রদত্ত

$$D\sin\alpha=\pm n\lambda,\ n=1, 2, 3,\cdots \qquad \cdots\ 3\cdot4$$

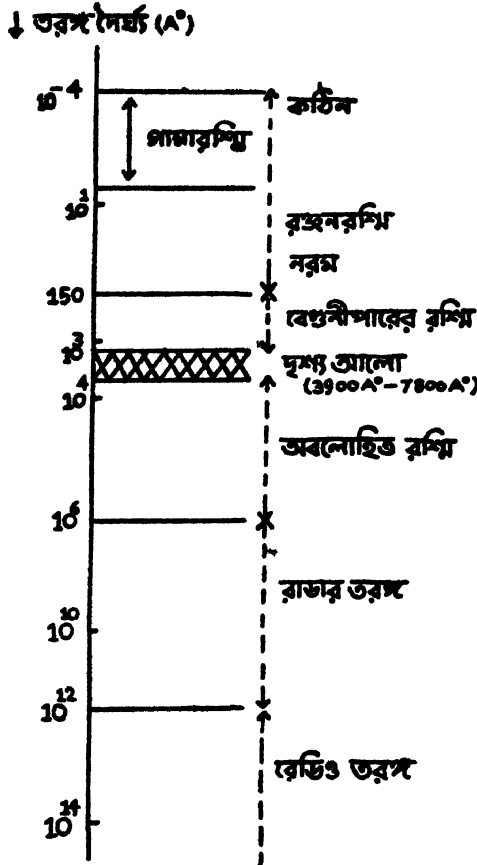
3·2 চিত্রে পর্দার ভিতর বিভিন্ন অঞ্চলে POP′ রেখা বরাবর আলোর তীব্রতার কিভাবে হ্রাসবৃদ্ধি ঘটে তাও একটি লেখ এঁকে দেখান হয়েছে। যখন উপরিলিখিত সর্তটি পালিত হয় তখন তীব্রতার পরিমাণ শূন্য হয়, তবে O′ বিন্দু থেকে যত দূরে যাওয়া যায় ততই গড় তীব্রতার পরিমাণ দ্রুত হ্রাস পেতে থাকে, O′ বিন্দুতেই তীব্রতা হয় সর্ব্বাধিক। এই বিন্দুর দুইপাশে P এবং P′ বিন্দুতে তীব্রতা সর্ব্বপ্রথম শূন্য পরিমাণে এসে পৌঁছায়, ঐ বিন্দুদ্বয় O′ বিন্দুর দুইধারে প্রতিসমভাবে অবস্থিত। আলোক-রশ্মিগুলি যে কোণে অগ্রসর হয়ে P বা P′ বিন্দুতে এসে পৌঁছায় তাকে বলা হয় কেন্দ্রীয় চরম তীব্রতা অঞ্চলের অর্দ্ধকৌণিক বিস্তৃতি। 3·3 সর্ত থেকে অর্দ্ধকৌণিক বিস্তৃতির পরিমাণ প্রকাশ করা যায়

$$\sin\alpha=\frac{\lambda}{D} \qquad \cdots \qquad \cdots\ 3\cdot5$$

সুতরাং D যত ছোট হবে কেন্দ্রীয় চরম তীব্রতা অঞ্চলের অর্দ্ধকৌণিক বিস্তৃতি হবে তত বেশী, যখন $D=\lambda$, $\sin\alpha=1$, $\alpha=90°$, সুতরাং তখন সমগ্র পর্দাটির ভিতর কেন্দ্রীয় চরমাবস্থাটি বর্ত্তমান থাকবে।

তাড়িৎচুম্বকীয় বিকিরণকে বিশেষিত করা যায় এর তরঙ্গদৈর্ঘ্য বা স্পন্দনাঙ্ক উল্লেখ করে এবং এইসব বিকিরণের ধর্ম্মাবলী একমাত্র নির্ভর করে এদের তরঙ্গদৈর্ঘ্যের উপর। তরঙ্গদৈর্ঘ্যের এককের নাম এ্যাঙ্স্ট্রম (A°)।

$$1A°=10^{-8} \text{ সেণ্টিমিটার}$$

সবচেয়ে ছোট তরঙ্গদৈর্ঘ্যবিশিষ্ট রশ্মিগুলিকে বলা হয় কঠিন (hard) রঞ্জনরশ্মি অথবা গামারশ্মি (সচরাচর ~10^{-2}A° অথবা এর কম), সর্বাধিক তরঙ্গদৈর্ঘ্যের বিকিরণকে বলা হয় বেতারতরঙ্গ। 3·3 চিত্রে বিভিন্ন তরঙ্গদৈর্ঘ্যবিশিষ্ট বিভিন্ন নামীয় রশ্মিগুলির অবস্থানের একটি তুলনামূলক চিত্র দেখান হয়েছে, পরবর্তী অধ্যায়ে এদের পর্য্যবেক্ষণ পদ্ধতি সম্বন্ধে সংক্ষিপ্ত আলোচনা করা হবে।

চিত্র 3·3

আলোককণা (Photon)

পদার্থ যে কতগুলি পরমাণুর সমষ্টিমাত্র এই প্রস্তাবনা বিভিন্ন বৈজ্ঞানিক পরীক্ষার সঙ্গে খুবই সামঞ্জস্যপূর্ণ, এছাড়া বিদ্যুতের প্রকৃতিও পারমাণবিক অর্থাৎ বৈদ্যুতিক আধানেরও একটি ক্ষুদ্রতম একক পরিমাণ আছে (ইলেকট্রন বা প্রোটনের আধানে e) যা অবিভাজ্য। পূর্বের পরিচ্ছেদগুলিতে বিকিরিত

শক্তির তরঙ্গধর্ম্ম সম্বন্ধে আলোচনা করা হয়েছে, কিন্তু আলোক বিকিরণ পদ্ধতির আরও সূক্ষ্মতর বিশ্লেষণ করলে দেখতে পাওয়া যায় যে যাবতীয় বিকিরণের একরকম কণাধর্ম্মও রয়েছে। বিদ্যুৎচুম্বকীয় বিকিরণের কণাপ্রকৃতি বর্ত্তমান শতাব্দীর প্রথমদিকে আবিষ্কৃত হয়। পরীক্ষার ফলে দেখা গেছে, তাড়িৎ-চুম্বকীয় বিকিরণজাত শক্তি যখন শোষিত বা বিকীরিত হয় তখন সবসময়ই একসঙ্গে একটি নির্দ্দিষ্ট পরিমাণের শক্তির শোষণ বা বিকিরণ ঘটে। এই নির্দ্দিষ্ট পরিমাণ নির্ভর করে বিকিরণের স্পন্দনাঙ্কের উপর এবং একে বলা হয় এক কোয়াণ্টাম বিকিরণজাত শক্তি। জার্ম্মান বিজ্ঞানী ম্যাক্স প্ল্যাঙ্ক (Max Planck) সর্ব্বপ্রথম কোয়াণ্টাম প্রকল্পের উদ্ভাবন করেন, প্ল্যাঙ্কের তত্ত্ব অনুযায়ী যে নির্দ্দিষ্ট পরিমাণে বিকিরণজাত শক্তি শোষিত বা বিকিরিত হয় তা নিম্নলিখিত সম্বন্ধের দ্বারা প্রকাশিত

$$E = h\nu \qquad \cdots \qquad \cdots \qquad 3\cdot6$$

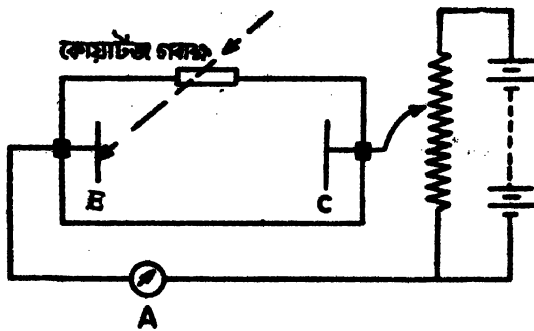
এখানে ν বিকিরণের স্পন্দনাঙ্ক এবং E এক কোয়াণ্টাম বিকিরণজাত শক্তি, h একটি ধ্রুবরাশি, এর পরিমাণ সমস্ত স্পন্দনাঙ্কের ক্ষেত্রেই সমান। ν স্পন্দনাঙ্কবিশিষ্ট বিকিরণ কতগুলি কোয়াণ্টামের সমষ্টিমাত্র যাদের প্রত্যেকেই উপরোক্ত E পরিমাণের শক্তি বহন করে এবং কখনই এর চেয়ে কম বা অধিক শক্তি বহন করতে পারে না। সুতরাং এই প্রকল্প অনুযায়ী বিদ্যুৎ এবং পদার্থের মত বিকিরণজাত শক্তিও কণাধর্ম্মী। প্ল্যাঙ্ক সম্পূর্ণ কৃষ্ণকায় পদার্থের বিকিরণধর্ম্ম ব্যাখ্যা করতে গিয়ে এই তত্ত্বটি আবিষ্কার করেন। ম্যাকসওয়েলের বিদ্যুৎচুম্বকীয় তরঙ্গের সাহায্যে সম্পূর্ণ কৃষ্ণকায় পদার্থের শক্তি বিকিরণের পদ্ধতি ব্যাখ্যা করা যায় না, তাতে কতগুলি অস্বাভাবিক বৈপরীত্যের সম্মুখীন হতে হয়। কিন্তু যদি বিকিরণের কোয়াণ্টাম ধর্ম্মকে স্বীকার করে নেওয়া হয় তবে সহজেই পরীক্ষালব্ধ বিকিরণের প্রকৃতি ব্যাখ্যা করা সম্ভব। এক কোয়াণ্টাম বিকিরিত শক্তির একটি বিশেষ নাম দেওয়া হয়েছে, একে বলা হয় আলোককণা এবং কোন বিকিরণের আলোক-কণা কতটা শক্তি বহন করবে তা শুধুমাত্র ঐ বিকিরণের স্পন্দনাঙ্কের উপর নির্ভর করে। কোন পদার্থকণার ক্ষেত্রে, যেমন ইলেকট্রন, এর স্থির ভর m_0 সবসময় একটি ধ্রুবক। কিন্তু আলোককণার ক্ষেত্রে, যেহেতু প্রকৃতির ভিতর স্পন্দনাঙ্কের সন্তত বিতরণ লক্ষ্য করা যায়, এদের শক্তিও সন্ততভাবে বিতরিত থাকতে পারে; শুধু নির্দ্দিষ্ট স্পন্দনাঙ্কের জন্য আলোককণার শক্তি নির্দ্দিষ্ট। বিকিরণের এই তত্ত্ব অনুযায়ী কোথাও বিকীরিত রশ্মির তীব্রতার আধিক্য বলতে আমরা বুঝি ঐখানে ঐ বিকিরণের আলোককণাগুলি অধিক

পরিষ্কার উপস্থিত আছে। কিন্তু পূর্ববর্তী পরিচ্ছেদে আলোচিত আলোর তরঙ্গধর্মের সঙ্গে এই নবাবিষ্কৃত কণাধর্মের সামঞ্জস্যবিধান কিভাবে সম্ভব? পরবর্তীকালে কোয়াণ্টাম বলবিজ্ঞানের সাহায্যে আলোর প্রকৃতির এই দ্বৈততার যুক্তিসঙ্গত বিবরণ দেওয়া হয়েছে, এই বিষয়ে আমরা পরে কিছু আলোচনা করব।

আলোকবিদ্যুৎ প্রক্রিয়া (Photo-electric effect)

আমরা এইবার একটি প্রক্রিয়ার বিষয় আলোচনা করব যাথেকে বিকিরণজাত শক্তির কোয়াণ্টাম প্রকৃতি সহজে ও সরাসরিভাবে অনুধাবন করা যায়, এই প্রক্রিয়াটির নাম আলোকবিদ্যুৎ প্রক্রিয়া। দেখা গেছে যে, কোন কোন পদার্থের উপর আলো পড়লে এদের ভিতর থেকে ইলেকট্রন নির্গত হয়ে আসে, এইভাবে নির্গত ইলেকট্রনগুলিকে বলা হয় ফোটো ইলেকট্রন। ফোটো ইলেকট্রনগুলি সাধারণতঃ পদার্থের উপরিতলে কিংবা উপরিতলের খুবই সন্নিহিত অভ্যন্তরপ্রদেশে সৃষ্টি হয় এবং সৃষ্টির পর সাধারণতঃ এদের যথেষ্ট পরিমাণে গতিশক্তি থাকে যার ফলে এরা পদার্থের দেহ থেকে উৎক্ষিপ্ত হয়ে আসে। পরীক্ষায় দেখা যায় যে কখন কখন কোন ঋণ আহিত বস্তুর উপর বেগুনীপারের আলো ফেললে তার ফলে ঐ বস্তুটির ভিতর থেকে ঋণ আধান দ্রুত লোপ পেতে থাকে, আবার কোন কোন আধানশূন্য পদার্থের উপর যদি বেগুনীপারের আলো ফেলা যায় তবে সেটি ধন আধানে আহিত হয়ে পড়ে। এই প্রক্রিয়াগুলির খুব স্বাভাবিক ব্যাখ্যা হ'ল যে নিক্ষিপ্ত আলো পদার্থের ভিতর শোষিত হয় এবং এই শোষিত আলোর শক্তি ইলেকট্রনের ভিতর সঞ্চারিত হয় যার প্রভাবে ইলেকট্রন পদার্থের বন্ধনমুক্ত হয়ে বেরিয়ে আসতে পারে।

3·4 চিত্রে পরীক্ষাগারে আলোকবিদ্যুৎ প্রক্রিয়া কিভাবে অনুশীলন করা হয় তা দেখান হয়েছে। কোন আলোর উৎস থেকে আলো একটি কোয়ার্টজ গবাক্ষের ভিতর দিয়ে একটি ছোট প্রকোষ্ঠের অভ্যন্তরে E প্লেটে এসে পড়ে। কোয়ার্টজ বেগুনীপারের রশ্মিতেও স্বচ্ছ থাকে এইজন্য এই পদার্থের গবাক্ষ প্রস্তুত করা হয়। C প্লেটটি E-এর তুলনায় উচ্চ বিভবে থাকায় E-এর ভিতর আলোকবিদ্যুৎ প্রক্রিয়ায় যে ইলেকট্রনগুলি নির্গত হয় সেগুলি C-এর দিকে আকর্ষিত হয়ে আসে। এইভাবে C-তে ক্রমাগত ইলেকট্রন এসে পড়তে থাকায় বিদ্যুৎপ্রবাহের সৃষ্টি হয় যার পরিমাণ A এ্যামিটারের

ভিতর মাপা যায়। পরীক্ষায় নিক্ষিপ্ত আলোর স্পন্দনাঙ্ক বদল করে প্রতিটি আলাদা স্পন্দনাঙ্কের জন্য বিদ্যুৎপ্রবাহের পরিমাণ মাপা হয়। পরীক্ষায় দেখা যায় যে A-এর ভিতর দিয়ে বিদ্যুৎপ্রবাহের পরিমাণ নির্ভর করে নিক্ষিপ্ত আলোর তীব্রতার উপর এবং প্রত্যেকটি বিভিন্ন পদার্থের জন্য আপতিত স্পন্দনাঙ্কের একটি সীমা আছে যার কম হলে কোন ফোটো ইলেকট্রনই নির্গত হয় না। এই দ্বিতীয় ঘটনাটি নিক্ষিপ্ত আলোর তীব্রতা নিরপেক্ষ অর্থাৎ আলোর তীব্রতা যতই বেশী হউক না কেন এর স্পন্দনাঙ্ক যদি একটি বিশেষ স্পন্দনাঙ্কের কম হয় তবে কখনই ফোটো ইলেকট্রন নির্গত হবে না। বিভিন্ন পদার্থের আলোকবিদ্যুৎ প্রক্রিয়া অনুশীলন করার জন্য ঐসকল পদার্থে গঠিত প্লেট E-এর স্থানে রাখা হয় এবং প্রত্যেকটি পদার্থের জন্য আলোকবিদ্যুৎ প্রক্রিয়ায় এইরকম একটি ন্যূনতম স্পন্দনাঙ্ক লক্ষ্য করা যায়, যার পরিমাণ প্রতিক্ষেত্রে স্বতন্ত্র। এই ঘটনাটি সনাতন পদার্থবিজ্ঞানের ভিত্তিতে বোঝা অসম্ভব। পদার্থের ভিতর থেকে একটি ইলেকট্রনকে উৎখাত করতে হলে এর ভিতর নির্দিষ্ট পরিমাণ শক্তি সঞ্চার করা প্রয়োজন যার সাহায্যে ইলেকট্রনটি পদার্থের বন্ধনমুক্ত হয়ে বেরিয়ে আসতে পারবে। প্রাচীন পদার্থবিজ্ঞান অনুযায়ী নিক্ষিপ্ত আলোকশক্তির পরিমাণ,

চিত্র 3·4
আলোকবিদ্যুৎ প্রক্রিয়া পর্যবেক্ষণের জন্য সহজ পরীক্ষার আয়োজন।

অর্থাৎ প্রতি একক ক্ষেত্রফলাপিছু যতটা আলোকশক্তি আপতিত হচ্ছে তার পরিমাণ, নির্ভর করে শুধু আলোর তীব্রতার উপর। সুতরাং এই তথ্যের ভিত্তিতে, যদি নিক্ষিপ্ত আলোর উপযুক্ত পরিমাণ তীব্রতা থাকে তবে যেকোন স্পন্দনাঙ্কের আলোই যেকোন পদার্থের ভিতর থেকে ফোটো-ইলেকট্রন নির্গত করাতে সক্ষম হবে। কিন্তু আমরা দেখতে পাই যে পরীক্ষালব্ধ ফলাফল এই ধারণার সম্পূর্ণ পরিপন্থী, আরও দেখা গেছে যে নিক্ষিপ্ত

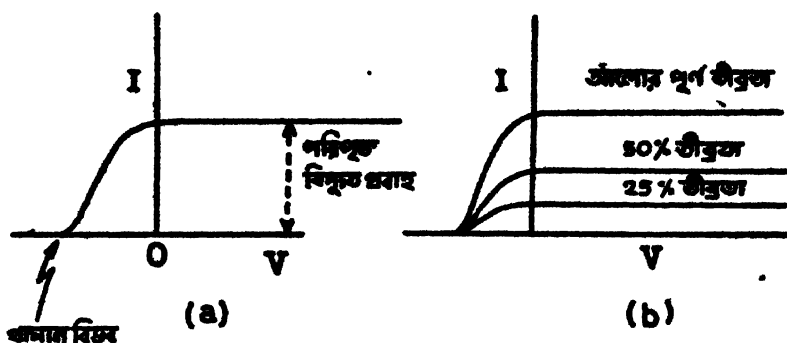
আলোর স্পন্দনাঙ্ক যদি উপরোক্ত ন্যূনতম স্পন্দনাঙ্কের অধিক হয় তবে তীব্রতার পরিমাণ অতি সামান্য হলেও তার দ্বারা ফোটো ইলেকট্রন নির্গত হবে। আলোক উৎসের শক্তি বিকিরণের হার এবং উৎস থেকে পরীক্ষাধীন পদার্থের দূরত্ব জানা থাকলে এর উপর আলোর তীব্রতা কত তা সহজেই গণনা করা যায়

$$I = Q/4\pi R^2$$

এখানে Q শক্তিবিকিরণের পরিমাণ, R দূরত্ব এবং I ঐ দূরত্বে তীব্রতার পরিমাণ অর্থাৎ দূরত্বের বর্গের ব্যস্ত অনুপাতে আলোর তীব্রতা হ্রাস পেতে থাকে। পরীক্ষার দ্বারা সহজেই একটি তলের উপর গড়ে প্রতি সেকেণ্ডে প্রতি বর্গ-সেণ্টিমিটার পিছু কত পরিমাণ আলোকশক্তি আপতিত হচ্ছে তা গণনা করা যায় এবং কতগুলি পরমাণু ঐ আলোর শোষণে অংশগ্রহণ করে তাও অনুমান করা চলে। এথেকে, আলোকবিদ্যুৎ প্রক্রিয়ার ফলে উৎপন্ন একটি ইলেকট্রনের যত গতিশক্তি থাকে এইভাবে একটি পরমাণুর মধ্যে সেই পরিমাণ শক্তি শোষিত হতে কত সময় লাগে তা নির্ণয় করা যেতে পারে। কোন কোন পরীক্ষায় আপতিত আলোর তীব্রতা এত কমিয়ে ফেলা হয়েছিল যে, শোষণের দ্বারা একটি ফোটো ইলেকট্রনের সমান শক্তি অর্জ্জন করতে একটি পরমাণুর গড়ে এক থেকে দুই বছর সময় লাগে। কিন্তু দেখা গেছে যে, ঐসব ক্ষেত্রেও আলো এসে পড়ার সঙ্গে সঙ্গে ফোটো ইলেকট্রন নির্গত হচ্ছে। এথেকে বোঝা যায় যে, সনাতন পদার্থবিজ্ঞান অনুযায়ী আলোকপ্রবাহের তরঙ্গসম্মুখের উপর আলোকশক্তি সমমাত্রভাবে বিতরিত নেই। এই ধরণের পরীক্ষা কোয়াণ্টাম প্রকল্পের যুক্তিযুক্ততাকে নিশ্চিতভাবে প্রমাণ করে।

3·4 চিত্রের আয়োজনের সাহায্যে বিভব ব্যবধানের অপেক্ষক হিসাবে বিদ্যুৎপ্রবাহের পরিমাণ লক্ষ্য করলে 3·5(a) চিত্রের লেখটি পাওয়া যায়। যখন বিভব ব্যবধানের পরিমাণ শূন্য বা ঋনরাশি তখনও বৈদ্যুতিক প্রবাহ বর্ত্তমান থাকে, আবার অধিক বিভবব্যবধানের জন্য বৈদ্যুতিক প্রবাহ একটি ধ্রুব পরিমাণ প্রাপ্ত হয়। ঋণ বিভব ব্যবধান বলতে বোঝায় সেক্ষেত্রে E, C-এর তুলনায় উচ্চতর বিভব ব্যবধানে অবস্থান করে। যদি এই বিভব ব্যবধান যথোপযুক্ত পরিমাণের হয় তবে C-তে পৌঁছাবার আগেই ফোটো ইলেকট্রনগুলির সমস্ত শক্তি নিঃশোষিত হয়ে যাবে, এই কারণেই সে অবস্থার বর্ত্তনীর ভিতর বিদ্যুৎপ্রবাহের পরিমাণ হয় শূন্য। যে ন্যূনতম ঋণবিভবের জন্য বিদ্যুৎপ্রবাহের পরিমাণ শূন্য হয়ে পড়ে তাকে বলা হয় "থামান বিভব",

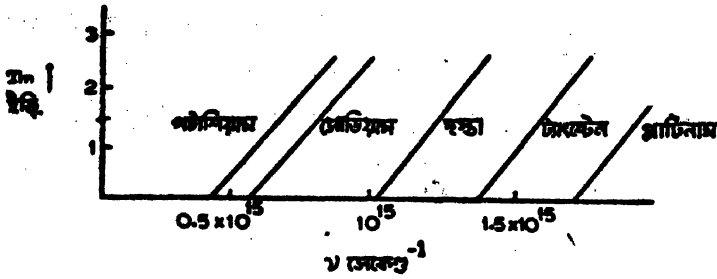
এর পরিমাণও আপতিত আলোর তীব্রতা নিরপেক্ষ, শুধু নির্ভর করে এর তরঙ্গদৈর্ঘ্যের উপর। যেহেতু বৈদ্যুতিক বিকর্ষণের ফলে ইলেকট্রনগুলি থেমে যায় সুতরাং আমরা নিম্নলিখিত সর্তটি পাই

$$\frac{1}{2}mv^2 = V_0 e \qquad \cdots \qquad \cdots \quad 3{\cdot}7$$

চিত্র 3.5

আলোকবিদ্যুৎ প্রক্রিয়ার পরীক্ষায় প্রাপ্ত বিদ্যুৎপ্রবাহ ও আবিষ্ট বিভবের মধ্যে সম্বন্ধ।

এক্ষেত্রে v নির্গত ইলেকট্রনের গতিবেগ এবং V_0 থামান বিভব। যথেষ্ট অধিক বিভব ব্যবধানের জন্য বর্তনীর ভিতর বিদ্যুৎপ্রবাহ যে শেষপর্য্যন্ত একটি ধ্রুব পরিমাণ প্রাপ্ত হয় তাথেকে বোঝা যায় যে উৎপন্ন ফোটো ইলেকট্রনগুলির সংখ্যা নির্দিষ্ট যখন মোটামুটি সমস্ত ইলেকট্রনগুলিই C-এর ভিতর সংগৃহীত হয় তখনই বিদ্যুৎপ্রবাহ চরম পরিমাণ প্রাপ্ত হয়, এরপর বিভব ব্যবধানে V-এর পরিমাণ আরও বৃদ্ধি করলেও অবস্থার কোন পরিবর্তন হয় না। অবশ্য এই চরম প্রবাহের পরিমাণ আপতিত আলোর তীব্রতার উপর নির্ভরশীল যা 3·5(b) চিত্র থেকে দেখা যাচ্ছে; এথেকে বোঝা যায় যে, তীব্রতা বৃদ্ধির সাথে সাথে মোট উৎপন্ন ইলেকট্রনের সংখ্যাও বৃদ্ধিপ্রাপ্ত হয়। এভাবে উৎপন্ন কণাগুলি যে আসলে ইলেকট্রন তা এদের e/m নির্ণয়ের দ্বারা নিশ্চিতভাবে প্রমাণ করা সম্ভব হয়েছে।

ফোটো ইলেকট্রনগুলির থামান বিভব মেপে 3·7 সর্তের সাহায্য নিয়ে এদের গতিশক্তি নির্ণয় করা যায়। এদের গতিশক্তির মধ্যে সামান্য বিতরণ

লক্ষ্য করা যায়, তবে থামান বিভব যে গতিশক্তিকে নির্দেশ করে তা হ'ল চরম গতিশক্তি, T_m। কোন একটি ধাতুর ক্ষেত্রে এই চরম গতিশক্তির পরিমাণ যদি আপতিত আলোর স্পন্দনাঙ্কের অপেক্ষক হিসাবে মাপা হয় তবে 3·6 চিত্রে প্রদর্শিত লেখগুলি পাওয়া যায়। চিত্রে বিভিন্ন ধাতুর জন্য উপরোক্ত লেখ অঙ্কন করা হয়েছে এবং প্রতিক্ষেত্রেই লেখ একটি সরলরেখা, বাস্তবিকপক্ষে রেখাগুলি পরস্পর সমান্তরাল অর্থাৎ এদের

চিত্র 3·6

আলোর স্পন্দনাঙ্ক ও নির্গত ফোটো ইলেকট্রনের চরম শক্তির মধ্যে সরল সম্বন্ধ।

প্রত্যেকের আপতন সমান। সোডিয়াম এবং পটাসিয়াম ক্ষারধাতুদ্বয়ের ক্ষেত্রে এই ধরণের লেখ অঙ্কন করা অপেক্ষাকৃত সহজ কারণ দৃশ্য আলোর দ্বারাই ঐ দুই ধাতুর মধ্য থেকে ফোটো ইলেকট্রন উৎপন্ন করা সম্ভব এবং দৃশ্য আলোর স্পন্দনাঙ্ক নির্ণয় করা অপেক্ষাকৃত সহজ। প্রতিটি ধাতুর ক্ষেত্রেই এক একটি স্বতন্ত্র ন্যূনতম স্পন্দনাঙ্ক লক্ষ্য করা যায় যার কমে কোন ফোটো ইলেকট্রন উৎপন্ন হয় না, এর অধিক স্পন্দনাঙ্ক হলে আলোকবিদ্যুৎ-প্রক্রিয়া শুরু হয় এবং উৎপন্ন ফোটো ইলেকট্রনের গতিশক্তি আপতিত স্পন্দনাঙ্কের সরল অনুপাতে বৃদ্ধি পেতে থাকে। আরও লক্ষ্য করা যায় যে, এই লেখগুলির প্রত্যেকটিই সম্পূর্ণরূপে আপতিত আলোর তীব্রতা নিরপেক্ষ।

আলোকবিদ্যুৎ প্রক্রিয়ার কোয়াণ্টাম তত্ত্ব

আলোকবিদ্যুৎ প্রক্রিয়ার প্রথম সুষ্ঠু ব্যাখ্যা দিলেন আইনস্টাইন, প্ল্যাঙ্কের কোয়াণ্টামতত্ত্বের ভিত্তিতে। আইনস্টাইনের ব্যাখ্যা অনুযায়ী আলোকবিদ্যুৎ প্রক্রিয়া একটি কোয়াণ্টাম ঘটনা, বিক্ষিপ্ত আলো হ'ল কতগুলি আলোককণার সমষ্টি যাদের প্রত্যেকটিই প্ল্যাঙ্কের সূত্র অনুযায়ী নির্দিষ্ট পরিমাণের শক্তি

বহন করে। এইরকম একটি আলোককণা পদার্থের উপর আপতিত হলে পরমাণুর দ্বারা শোষিত হয় এবং এর সমস্ত শক্তি তখন একটি ইলেকট্রনের ভিতর সঞ্চারিত হয় এবং এই অর্জিত শক্তির প্রভাবে ইলেকট্রনটি পদার্থের বন্ধন থেকে মুক্ত হয়ে বেরিয়ে আসে। নিম্নলিখিত সমীকরণের সাহায্যে প্রক্রিয়াটি বিবৃত করা যায়

$$h\nu = \tfrac{1}{2}mv^2 + E_0 = T_m + E_0 \qquad \cdots \qquad \cdots \qquad 3{\cdot}8$$

E_0 হ'ল সেই পরিমাণ শক্তি যা একটি ইলেকট্রনকে পদার্থের বন্ধনদশা থেকে মুক্ত করতে প্রয়োজন হয়। শোষিত আলোককণার শক্তি এইভাবে দুই অংশে বিভক্ত হয়ে যায়, একটি অংশ ব্যয়িত হয় ইলেকট্রনটিকে বন্ধনদশা থেকে মুক্ত করতে এবং বাকী অংশ ঐ ইলেকট্রনের গতিশক্তিতে রূপান্তরিত হয়। স্পষ্টতঃই, নিক্ষিপ্ত আলোককণার শক্তি যদি E_0 এর চেয়ে কম হয় তবে ইলেকট্রনটি বন্ধনমুক্ত হতে পারে না সুতরাং কোন আলোকবিদ্যুৎ প্রক্রিয়া সম্ভব নয়। যদি লেখা যায়

$$E_0 = h\nu_0 \qquad \cdots \qquad \cdots \qquad 3{\cdot}9$$

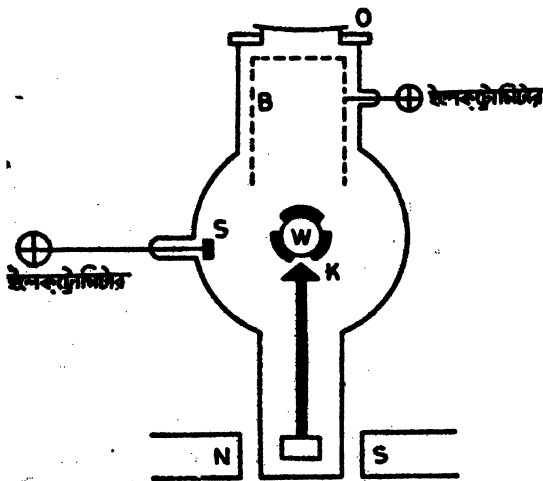
তবে ν_0 হ'ল সেই ন্যূনতম স্পন্দনাঙ্ক যার কমে আলোকবিদ্যুৎ প্রক্রিয়া লক্ষ্য করা সম্ভব নয়। E_0 হ'ল পরীক্ষাধীন পদার্থের উপর নির্ভরশীল একটি ধ্রুবক, একে বলা হয় ঐ বিশেষ পদার্থের "আলোক বৈদ্যুতিক প্রান্তিক শক্তি" 3·8 সমীকরণ পরীক্ষালব্ধ 3·6 চিত্রের লেখগুলিকে সুন্দরভাবে ব্যাখ্যা করে। এই সমীকরণটিতে যে h ধ্রুবকটির আবির্ভাব ঘটে সেটি যে একটি সর্বজনীন ধ্রুবক তা ঐ সরলরেখাগুলির ঢাল আপতনের পরিমাণ থেকেই প্রতীয়মান হয়। কোয়াণ্টামতত্ত্বে আলোর তীব্রতা বলতে বোঝায় প্রতি একক ঘনফলে আপতিত আলোককণার ঘনত্বের পরিমাণ, কিন্তু আলোকবিদ্যুৎ প্রক্রিয়া একটি কোয়াণ্টাম প্রক্রিয়া, এতে একটি আলোককণা শোষিত হয়ে একটি ফোটো ইলেকট্রন সৃষ্টি করে, সুতরাং নিক্ষিপ্ত আলোককণার ঘনত্ব অর্থাৎ তীব্রতা যত বেশীই হউক না কেন এদের এক একটির দ্বারা বাহিত শক্তির পরিমাণ যদি যথাযোগ্য না হয় তবে কখনই ফোটো ইলেকট্রন নির্গত হতে পারে না। আবার যথাযোগ্য শক্তি থাকলে একটিমাত্র আলোককণা নিক্ষিপ্ত হলেও তাথেকে একটি ফোটো ইলেকট্রন উৎপন্ন হতে পারে। সৃষ্ট ইলেকট্রনগুলির মোট সংখ্যা অবশ্য নির্ভর করে আলোর তীব্রতার উপর অর্থাৎ মোট আপতিত আলোককণার সংখ্যার উপর, কিন্তু এদের গতিশক্তি তীব্রতা নিরপেক্ষ, 3·8 সমীকরণ অনুযায়ী শুধু আপতিত আলোর স্পন্দনাঙ্কের উপরই নির্ভর করে।

ক্যাথোড পদার্থের ভিতর প্রত্যেক ইলেকট্রনের বন্ধনশক্তি সমান নয়, এদের বন্ধনশক্তির ভিতর সামান্য বিতরণ লক্ষিত হয় যার জন্য ফোটোইলেকট্রনগুলির গতিশক্তির মধ্যেও কিছু বিতরণ লক্ষ্য করা যায়। এই কারণেই 3·5 চিত্রে থামান বিভবের আবির্ভাবের অনেক আগেই বিদ্যুৎপ্রবাহের পরিমাণ দ্রুত হ্রাস পেতে থাকে। এছাড়া ফোটোইলেকট্রনগুলির একটি অংশ যেগুলি C প্লেটের দিকে লম্বভাবে অগ্রসর না হয়ে তির্য্যকভাবে উৎপন্ন হয়, এগুলি কক্ষটির দেওয়ালে গিয়ে নষ্ট হয়ে যায়, এভাবেও বিদ্যুৎপ্রবাহের পরিমাণ হ্রাস পায়।

প্ল্যাঙ্কের প্রকল্প অনুযায়ী h একটি সর্ব্বজনীন ধ্রুবক এবং 3·6 চিত্রের লেখগুলির সাহায্যে এই ধ্রুবকটির পরিমাণ নির্ণয়ের একটি সুনির্দিষ্ট পন্থা নির্দ্ধারিত হয়। এই পরিমাপের জন্য সোডিয়াম কিংবা পটাশিয়াম ধাতু ব্যবহার করা সুবিধাজনক কারণ এদের ক্ষেত্রে দৃশ্য আলোতে আলোকবিদ্যুৎ প্রক্রিয়া ঘটে এবং দৃশ্য আলোর স্পন্দনাঙ্ক অত্যন্ত নির্ভুলভাবে নির্ণয় করার নানাবিধ উপায় আছে। তবে থামান বিভব পদ্ধতিতে T_m নির্ণয় করা খুব নির্ভুল নয়। ষষ্ঠ অধ্যায়ে ফোটোইলেকট্রনের গতিশক্তি পরিমাপের একটি উন্নততর পদ্ধতি বর্ণনা করা হয়েছে।

মিলিকানের পরীক্ষা

আলোকবিদ্যুৎ প্রক্রিয়া প্রথম লক্ষ্য করেন হার্টজ, তারপর লেনার্ড এই বিষয়টি নিয়ে বিস্তৃতভাবে পরীক্ষা করেন, কিন্তু লেনার্ডের পরীক্ষা খুব উন্নত-ধরণের ছিল না। পরে মিলিকান আলোকবিদ্যুৎ প্রক্রিয়ার উপর বিস্তৃতভাবে কতগুলি পরীক্ষা করেন যার দ্বারা তিনি আইনস্টাইনের কোয়াণ্টাম তত্ত্ব প্রদত্ত 3·8 সমীকরণটির যথার্থতা অত্যন্ত নির্ভুলভাবে প্রমাণ করতে সক্ষম হন। এছাড়া ঐ পরীক্ষা থেকে h-এর পরিমাণও খুব শুদ্ধভাবে নির্দ্ধারিত হয়। মিলিকান স্থির করলেন যে এমন সব ধাতুর তল নিয়ে পরীক্ষা করতে হবে যেগুলির রাসায়নিক বিশুদ্ধতা রয়েছে, এজন্য তিনি তাঁর পরীক্ষার একটি শূন্য আধারের অভ্যন্তরে ধাতু কেটে নূতন পরিশুদ্ধ ধাতুর তল সৃষ্টি করার আয়োজন রাখলেন। পরীক্ষাটি করা হয়েছে বিভিন্ন প্রকারের ক্ষারধাতুর উপর, পরীক্ষার আয়োজন 3·7 চিত্রে দেখা যাচ্ছে। একটি চাকা W, যার উপর তিন বিভিন্ন ক্ষার ধাতুর নির্মিত তিনটি সিলিণ্ডার যুক্ত আছে, এটিকে বাইরে থেকে ঘোরাবার ব্যবস্থা আছে। K একটি ছুরির আয়োজন যার দ্বারা ধাতুর উপরিতল চেঁছে ফেলে

নূতন পরিষ্কার তল উৎপন্ন করা যায়, এই আয়োজনটিকেও বাইরে থেকে বিদ্যুচ্চুম্বকীয় আয়োজনের সাহায্যে পরিচালিত করার ব্যবস্থা থাকে। O একটি গবাক্ষ যার ভিতর দিয়ে কক্ষটির ভিতর আলো প্রবেশ করে, ফোটোইলেকট্রন উৎপন্ন করার জন্য W চাকাটিকে ঘুরিয়ে যেকোন একটি ধাতুর তলকে O গবাক্ষের বরাবর নিয়ে আসা যায়, তারপর বিভিন্ন তরঙ্গদৈর্ঘ্যের আলো ঐ ধাতুর তলটির উপর নিক্ষেপ করা হয়। সমস্ত আয়োজনটিকেই অত্যধিক শূন্যতার ভিতর রাখা হয়। উৎপন্ন ফোটোইলেকট্রনগুলিকে একটি সিলিণ্ডার আকৃতির তারের জালি B এবং ধাতুর তলের মধ্যে সৃষ্ট বৈদ্যুতিক ক্ষেত্রের প্রভাবের দ্বারা প্রতিত্বরিত করা হয় এবং এগুলিকে এভাবে জালির মধ্যে পৌঁছান থেকে নিবৃত্ত করা যায়। জালিটির উপর রূপার অক্সাইডের একটি আবরণ থাকে কারণ সাধারণ ব্যবহৃত আলোতে রূপার অক্সাইড কোন আলোকবিদ্যুৎ প্রক্রিয়া সৃষ্টি করে না। বিকিরণশীল ধাতুর তল এবং ইলেকট্রন আহরক জালির ভিতর বিভব ব্যবধান ক্রমশঃ পরিবর্তিত করা হয় এবং জালির ভিতর যে ইলেকট্রন প্রবাহ এসে পৌঁছায় তা একটি ইলেকট্রোমিটারের সাহায্যে মাপা হয়।

চিত্র 3·7

আলোকবিদ্যুৎ প্রক্রিয়ার উপর পরীক্ষার জন্য মিলিকানের উন্নততর পরীক্ষার আয়োজন।

বিভিন্ন স্পন্দনাঙ্কের জন্য এই একই পরীক্ষার পুনরাবৃত্তি করা হয়। এইভাবে পরীক্ষা ক'রে 3·5 চিত্রের রেখাগুলির মতো রেখা উৎপন্ন করা যায় এবং তাদেরকে প্রতিটি স্পন্দনাঙ্কের জন্য থামান বিভবও মাপা সম্ভব। জালি এবং

বিকিরণশীল তলের মধ্যে যে বিভব ব্যবধান প্রয়োগ করা হয় এবং এদের মধ্যে বাস্তবিকপক্ষে যে বিভব ব্যবধানের অস্তিত্ব থাকে সেগুলি কিন্তু পরস্পর পৃথক। তার কারণ ঐ দুই বিভিন্ন পদার্থের ভিতর একরকম সংস্পর্শজনিত বিভব ব্যবধান বর্ত্তমান থাকে। থামান বিভবের পরিমাণ নির্ভুলভাবে জানতে হলে এই সংস্পর্শজনিত বিভব ব্যবধানের পরিমাণ জানা প্রয়োজন। একই পদার্থে গঠিত অপর একটি বিদ্যুৎধারক S, যার উপর কপার অক্সাইডের প্রলেপ লাগান আছে, এটির সহায়তা নিয়ে ঐ সংস্পর্শজনিত বিভব ব্যবধান (Contact potential) নির্ণয় করা সম্ভব। পরীক্ষার জন্য W চাকাটিকে ঘুরিয়ে পরীক্ষাধীন ধাতুর তলটিকে S এর মুখোমুখি নিয়ে আসা হয়। S এর সঙ্গে একটি ইলেকট্রোমিটার যুক্ত থাকে এবং বহিঃস্থ যান্ত্রিক আয়োজনের সাহায্যে এই বিদ্যুৎধারকটিকে আগুপিছু করা যায়। S এর উপর সামান্য কিছু বিভব (~1 ভোল্ট) প্রয়োগ ক'রে এটিকে আগুপিছু করা হয় এবং ফলে ইলেকট্রোমিটারের নির্দেশন বদলায় কিনা লক্ষ্য করা হয়, যদি নির্দেশনের কোনরূপ পরিবর্ত্তন না হয় তবে বুঝতে হবে যে ঐ প্রযুক্ত বিভব হ'ল সংস্পর্শজনিত বিভবের সমান কারণ সে অবস্থায় ধাতুর তল এবং S এর মধ্যে বৈদ্যুতিক ক্ষেত্রের তীব্রতার পরিমাণ হবে শূন্য।

নানারকম সতর্কতা অবলম্বিত হবার ফলে মিলিকানের পরীক্ষায় যে ফলাফল পাওয়া যায় তা অত্যন্ত নির্ভরযোগ্য। ফোটোইলেকট্রন বিকিরণশীল তলের মধ্যে যদি কোন রাসায়নিক অপরিশুদ্ধতা থাকে তবে তা ঐ তলের আলোকবৈদ্যুতিক প্রান্তিক শক্তির মান অনেকখানি পরিবর্ত্তিত ক'রে দিতে পারে। এই প্রান্তিক শক্তির মান বদলে গেলে T_m এর মানও বদলে যায়। এজন্য বারবার ক্ষারধাতুর সিলিণ্ডারগুলিকে ছুরি দিয়ে চেঁছে নূতন পরিশুদ্ধ তল সৃষ্টি করার ফলে এটি ঐ সম্ভাবনা থেকে মুক্ত থাকে। তাছাড়া সংস্পর্শজনিত বিভব ব্যবধান নির্ণয় ক'রে সেই শুদ্ধীকরণ প্রয়োগ করার ফলে থামান বিভবের মানও অত্যন্ত নির্ভুলভাবে নির্ণীত হয়। মিলিকানের পরীক্ষা থেকেই সর্ব্বপ্রথম প্ল্যাঙ্কের ধ্রুবক h-এর মান শুদ্ধভাবে নির্ণীত হয়, এর অধুনাস্বীকৃত মান হ'ল,

$$h=(6{\cdot}6252 \pm 0{\cdot}0002)\times 10^{-27} \text{ আর্গ সেকেণ্ড}$$

কণার তরঙ্গধর্ম্ম : ডিব্রগলি তরঙ্গ (De Broglie wave)

প্ল্যাঙ্কের সূত্র অনুযায়ী একটি আলোককণার শক্তি নিম্নলিখিতরূপে প্রকাশিত

$$E=h\nu=\frac{hc}{\lambda}$$

আবার আইনস্টাইনের আপেক্ষিকতা তত্ত্ব অনুসারে E পরিমাণ শক্তি $\frac{E}{c^2}$ পরিমাণ ভরের সমতুল্য। এভাবে বিচার করলে একটি আলোককণা যার শক্তি E, এর সমতুল্য ভরের পরিমাণ হবে

$$m^* = \frac{E}{c^2} = \frac{h\nu}{c^2} \qquad \cdots \qquad \cdots \qquad 3{\cdot}10$$

এবং ঐ আলোককণার ভরবেগের পরিমাণ†

$$p = m^*c = \frac{h}{\lambda} = hk \qquad \cdots \qquad \cdots \qquad 3{\cdot}11$$

$k = \frac{1}{\lambda}$ = তরঙ্গসংখ্যা, অর্থাৎ প্রতি সেণ্টিমিটারে ν স্পন্দনাঙ্কবিশিষ্ট আলোর তরঙ্গদৈর্ঘ্যের মোট সংখ্যা। সুতরাং এভাবে প্রতিটি আলোককণার নির্দিষ্ট ভরবেগ রয়েছে দেখা যায় এবং ঐ ভরবেগ আলোর স্পন্দনাঙ্কের সমানুপাতী। আলোর ভরবেগের কল্পনা অবশ্য কোয়াণ্টাম প্রকল্প কিংবা আপেক্ষিকতাতত্ত্বের তুলনায় প্রাচীন। ম্যাকসওয়েলের বিদ্যুৎচুম্বকীয় তত্ত্বের সাহায্যেও দেখান যায় যে আলোকশক্তি পদার্থের উপর আপতিত হলে চাপের সৃষ্টি করে। আলোর যে চাপ আছে এ তথ্যটি জ্যোতির্বিদেরা প্রথম অনুমান করেন ধূমকেতুর গতিপ্রকৃতি বিশ্লেষণ ক'রে। একটি ধূমকেতুর গতিপথে এর পুচ্ছ, যা আসলে অসংখ্য ক্ষুদ্র ক্ষুদ্র পদার্থকণার মেঘ ছাড়া আর কিছু নয়, ধূমকেতুর মূল বস্তুপিণ্ডের তুলনায় সবসময় সূর্য্যের উল্টাদিকে থাকে। এই ঘটনাটি ব্যাখ্যা করা হয় আলোর চাপের প্রকল্প উত্থাপন ক'রে, এই চাপ পুচ্ছের ক্ষুদ্র ক্ষুদ্র কণাগুলিকে মূল বস্তুপিণ্ডের পশ্চাতে ঠেলে দেয় অর্থাৎ মূল ভারী বস্তুপিণ্ডটি সূর্য্যের সবচেয়ে নিকটে থাকে এবং পুচ্ছটি থাকে এর পিছনে। এছাড়া পরীক্ষাগারেও নির্ভুল পরীক্ষায় আলোর চাপের অস্তিত্ব প্রমাণ করা সম্ভব হয়েছে। তবে ম্যাকসওয়েলের তড়িৎচুম্বকীয় তত্ত্বে এবং কোয়াণ্টাম তত্ত্বে আলোর চাপের ব্যাখ্যা করা হয় ভিন্ন ভিন্ন উপায়ে, শেষোক্ত তত্ত্বানুসারে আলোর চাপের সৃষ্টির কারণ প্রতিটি আলোককণা 3·11 সূত্র অনুযায়ী নির্দিষ্ট পরিমাণ ভরবেগ বহন করে। পরমাণু-বিজ্ঞানে কতকগুলি প্রক্রিয়া আছে যেগুলিতে আলোককণার ভরবেগের প্রশ্ন অঙ্গাঙ্গিভাবে জড়িত কিন্তু এগুলি ম্যাকসওয়েলের তড়িৎচুম্বকীয় তত্ত্বের সাহায্যে আদৌ ব্যাখ্যা করা যায় না। এরকম একটি প্রক্রিয়া হ'ল কম্পটনপ্রক্রিয়া

† 2·39 সম্বন্ধে $m_0 = 0$ এবং $E = h\nu$ বসালেও একই সমীকরণ পাওয়া যায়।

যেখানে আলোককণার সঙ্গে ইলেকট্রনের সংঘর্ষ ঘটে এবং আলোককণার কিছুটা ভরবেগ ইলেকট্রনের মধ্যে সঞ্চারিত হয়। এই প্রক্রিয়াটি একমাত্র কোয়ান্টাম তত্ত্বের দ্বারা বিশ্লেষণ করা সম্ভব। পরে এই প্রক্রিয়াটি সম্বন্ধে আমরা বিস্তৃতভাবে আলোচনা করবো।

এ পর্য্যন্ত আমরা দেখলাম যে বিকীরিত শক্তির এক ধরণের দ্বৈতপ্রকৃতি রয়েছে। এর তরঙ্গপ্রকৃতির জন্য ব্যতিচার ক্রিয়া ঘটে থাকে, আবার বিকিরণ হ'ল কতগুলি নির্দিষ্ট পরিমাণের শক্তি-সমন্বিত আলোককণার সমষ্টি যাদের নির্দিষ্ট ভরবেগ থাকে। আলোর ভিতর কণা ও তরঙ্গধর্ম্মের যুগপৎ অস্তিত্ব লক্ষ্য ক'রে বিজ্ঞানী ডিব্রগলি প্রস্তাব করলেন যে এই দ্বৈতধর্ম্ম সাধারণ বস্তুকণার ক্ষেত্রেও প্রযোজ্য হতে পারে। ডিব্রগলির মতে প্রত্যেক ধরণের কণা যেমন ইলেকট্রন, প্রোটন, অণু, পরমাণু, এদের মধ্যে স্বাভাবিক কণাধর্ম্ম ছাড়াও একধরণের তরঙ্গধর্ম্ম রয়েছে। এই প্রস্তাবটি নিম্নলিখিত গাণিতিক উপায়ে উপস্থাপিত করা যায়, আলোককণার প্রকৃতি অনুসরণ ক'রে পদার্থকণার ক্ষেত্রেও আমরা লিখি

$$p=\frac{h}{\lambda} \qquad \cdots \qquad \cdots \quad 3{\cdot}12$$

এখানে p পদার্থকণার ভরবেগ, λ, কণাটির সঙ্গে যে তরঙ্গ সংশ্লিষ্ট আছে সেই তরঙ্গের তরঙ্গদৈর্ঘ্য। এই সূত্রটি ঠিক আলোককণার ক্ষেত্রে প্রযুক্ত 3·11 সূত্রের অনুরূপ, অর্থাৎ মেনে নেওয়া হচ্ছে যে 3·12 সূত্রের প্রযোজ্যতা বহুব্যাপক ; এটি আলো এবং পদার্থকণা উভয়ক্ষেত্রেই প্রযোজ্য। যে পদার্থ-কণার ভর m এবং গতিবেগ v, এর ভরবেগ হবে

$$p=mv$$

p-এর এই পরিমাণ প্রয়োগ করলে আমরা পাই

$$\lambda=\frac{h}{mv} \qquad \cdots \qquad \cdots \quad 3{\cdot}13$$

3·13 সূত্রটিই ডিব্রগলির প্রস্তাবনার মূল বক্তব্য, অর্থাৎ কোন বস্তু বা কণা যার আপেক্ষিকতাভিত্তিক ভর m এবং গতিবেগ v, তার সঙ্গে একটি তরঙ্গ সংশ্লিষ্ট আছে যার তরঙ্গদৈর্ঘ্য এই সূত্রের দ্বারা প্রকাশিত। একই ধ্রুবক h বা প্ল্যাঙ্কের সূত্রের ভিতর আবির্ভূত হয়, ডিব্রগলি প্রকল্পের ভিতরও এর আবির্ভাব ঘটে।

ডিব্রগলির প্রস্তাবনা পদার্থবিজ্ঞানে আরেকটি যুগান্তকারী ঘটনা, প্লাঙ্ক ও আইনস্টাইনের কোয়ান্টাম প্রকল্প শুধু বিদ্যুৎচুম্বকীয় বিকিরণের ধর্মাবলীর মধ্যেই সীমাবদ্ধ ছিল, ডিব্রগলির প্রকল্প পদার্থের কণাসমূহের বলক্রিয়া বিশ্লেষণে কোয়ান্টাম তত্ত্বের প্রয়োগের ক্ষেত্রে এক গুরুত্বপূর্ণ পদক্ষেপ। পরবর্ত্তী অধ্যায়ে আমরা দেখাব যে ডিব্রগলি প্রকল্প ইলেকট্রনের ক্ষেত্রে প্রয়োগ করলে তা হাইড্রোজেন বর্ণালী বিশ্লেষণে বিজ্ঞানী নিলস্ বোরের যে প্রকল্প-সমূহ রয়েছে সেগুলি ব্যাখ্যা করতে সক্ষম। ডিব্রগলি প্রকল্প উত্থাপিত হবার কিছুকাল পর শ্রডিঙ্গার (Schrœdinger) প্রস্তাব করলেন যে কণাদের যদি তরঙ্গধর্ম্ম থাকে তবে আলোকতরঙ্গের মতো ঐ কণাতরঙ্গও একধরণের তরঙ্গ সমীকরণ মেনে চলবে। আলোকপ্রবাহ যে তরঙ্গ সমীকরণ মেনে চলে তার সঙ্গে তুলনা ক'রে শ্রডিঙ্গার পদার্থকণার সেই তরঙ্গ সমীকরণ আবিষ্কার করেন। এই সমীকরণের নাম শ্রডিঙ্গার সমীকরণ এবং এর দ্বারা পারমাণবিক স্তরের প্রক্রিয়াগুলির অত্যন্ত নির্ভুল গণনা সম্ভব। শ্রডিঙ্গারের সমীকরণের মাধ্যমে যে নূতন বলবিজ্ঞান সৃষ্টি হ'ল তাকেই বলা হয় কোয়ান্টাম বলবিজ্ঞান বা তরঙ্গ বলবিজ্ঞান। তবে দেখান যেতে পারে যে সাধারণ বৃহদাকার বস্তু যেগুলি বিপুলসংখ্যক অণু-পরমাণুর সমন্বয়ে গঠিত এদের গতি বিশ্লেষণের ব্যাপারে শ্রডিঙ্গার সমীকরণ এবং নিউটনের সমীকরণ উভয়ই অভিন্ন ফলাফল দিয়ে থাকে। কিন্তু অণু-পরমাণুর পারস্পরিক বলক্রিয়া এবং এদের শক্তিস্তরগুলির (চতুর্থ ও পঞ্চম অধ্যায় দ্রষ্টব্য) বিশ্লেষণের ক্ষেত্রে নিউটনীয় সমীকরণ আর প্রযোজ্য নয় এবং নির্ভুল ফলাফল পেতে হলে কোয়ান্টাম বলবিজ্ঞানের প্রয়োগ অনিবার্য্য।

এখানে মনে রাখা দরকার যে ডিব্রগলি প্রকল্পের অর্থ কখনই এই নয় যে ইলেকট্রন বা অন্যান্য কণা শুধু তরঙ্গ বা তরঙ্গসমষ্টি মাত্র। ইলেকট্রন অবশ্যই একটি পদার্থকণা, পদার্থের যাবতীয় ধর্ম্মাবলী এর রয়েছে, এটি ঋণ আধানে আহিত এবং ভরসমন্বিত, এর বিভিন্ন গতিবেগ থাকতে পারে এবং আপেক্ষিকতা তত্ত্ব অনুযায়ী এর গতিবেগ কখনই আলোর গতিবেগের সমান হতে পারে না। তবে আবার ইলেকট্রনের গতির মধ্যে একপ্রকার তরঙ্গধর্ম্মেরও অস্তিত্ব আছে এবং কিছু কিছু পরীক্ষায় এই তরঙ্গধর্ম্ম প্রকটিত হয়ে পড়ে। ইলেকট্রন বা অন্যান্য কণার মধ্যে তরঙ্গধর্ম্মের অস্তিত্বের কারণ হ'ল যে, এরা কোয়ান্টাম বলবিজ্ঞান অনুসারে চলে। এই বলবিজ্ঞানে কণা ও তরঙ্গধর্ম্মের একরকম সমন্বয় সাধিত হয়েছে, সুতরাং এদের এই দ্বৈতপ্রকৃতি মোটেই আশ্চর্য্যজনক নয়।

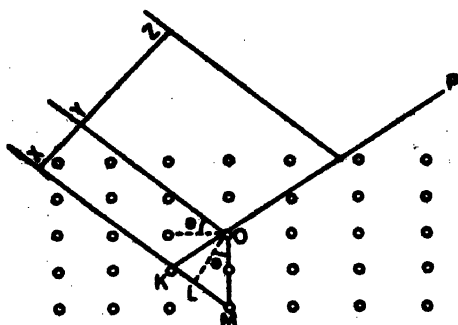
ইলেকট্রন তরঙ্গের ব্যতিচার পরীক্ষা

ইলেকট্রনের তরঙ্গধর্মের প্রস্তাব উত্থাপিত হবার পর বিজ্ঞানীরা পরীক্ষাগারে ঐ তরঙ্গের অস্তিত্ব প্রমাণ করার জন্য সচেষ্ট হন। এই বিষয়ে প্রথম সাফল্যজনক পরীক্ষা করেন বিজ্ঞানী ডেভিসন এবং জারমার ও পরে জি. পি. টমসন। বর্তমান পরিচ্ছেদে আমরা এই পরীক্ষাগুলির বিষয়ে একটু বিস্তৃতভাবে আলোচনা করবো। ব্যতিচার জালির (diffraction grating) দ্বারা আলোর ব্যতিচার ক্রিয়া সৃষ্টি করা যায়, কিন্তু সেক্ষেত্রে ব্যতিচারী আলোর তরঙ্গদৈর্ঘ্য জালিপ্রসারের নিকটবর্তী হওয়া প্রয়োজন, তরঙ্গদৈর্ঘ্যের পরিমাণ জালিপ্রসারের তুলনায় বহুগুণ বেশী বা বহুগুণ কম হলে ব্যতিচার ক্রিয়া লক্ষ্য করা সম্ভব হয় না। 3·13 সূত্রের সাহায্যে যদি 50 বা 100 ভোল্ট বিভব ব্যবধানে ত্বরিত ইলেকট্রনের তরঙ্গদৈর্ঘ্য গণনা করা হয় তবে দেখা যায় যে ঐ তরঙ্গদৈর্ঘ্য এত কম যে কোন সাধারণ জালির সাহায্যে ঐসকল তরঙ্গের ব্যতিচার পরীক্ষা করা সম্ভব নয়। কিন্তু জগতে প্রকৃতিদত্ত একরকম জালি আছে যাদের জালিপ্রসার খুবই কম, ইলেকট্রন তরঙ্গদৈর্ঘ্যের সঙ্গে তুলনীয়। এই প্রকৃতিদত্ত জালি হ'ল নানা ধরণের স্ফটিক যাদের ভিতর পরমাণুগুলি সারি সারি নির্দিষ্ট ধ্রুব দূরত্বে সজ্জিত থেকে এক ত্রিমাত্রিক জালির আকৃতি সৃষ্টি করে। সাধারণ আলোর ক্ষেত্রে যেমন দ্বিমাত্রিক জালি ব্যবহার ক'রে আলোর ব্যতিচার ক্রিয়া ঘটানো সম্ভব ঠিক তেমনি স্ফটিকের ভিতর সজ্জিত অণুগুলির দ্বারা গঠিত ত্রিমাত্রিক জালি ব্যবহার ক'রেও বিভিন্ন তরঙ্গ, যেমন ইলেকট্রন পদার্থ তরঙ্গের ব্যতিচার ঘটান সম্ভব। স্ফটিকের দ্বারা যে তরঙ্গের ব্যতিচার ঘটান সম্ভব এই প্রস্তাব প্রথম করেন জার্মান বিজ্ঞানী লাউয়ে (Laue), তিনি এবং তাঁর সহকর্মিবৃন্দ স্ফটিকের ভিতর দিয়ে রঞ্জনরশ্মি চালনা ক'রে ঐ রশ্মির ব্যতিচার প্রথম লক্ষ্য করেন।

লাউয়ের পরীক্ষায় দেখা যায় যে, রঞ্জনরশ্মির প্রবাহপথের চতুষ্পার্শ্বে প্রতিসমভাবে কতকগুলি বিন্দুতে রঞ্জনরশ্মির তীব্রতার পরিমাণ চরম হয়, অন্যান্য অঞ্চলে তীব্রতার পরিমাণ শূন্য থাকে। এর ফলে ফোটোগ্রাফীর প্লেটের উপর প্রতিসমভাবে কতগুলি কালো কালো বিন্দু ফুটে ওঠে। স্ফটিকের ভিতর পরমাণুগুলি স্তরে স্তরে সজ্জিত থাকে, এক-একটি স্তর হ'ল এক-একটি সমতল এবং এদের মধ্যে পরমাণুগুলি নির্দিষ্ট প্যাটার্ণ অনুযায়ী সাজান থাকে। এরকম দুটি পাশাপাশি সমান্তরাল সমতলের মধ্যে যে লম্বদূরত্ব, স্ফটিকের ক্ষেত্রে তাকেই বলা হবে জালিপ্রসার এবং এই দূরত্বের সঙ্গে তুলনীয় তরঙ্গদৈর্ঘ্য বিশিষ্ট যেকোন তরঙ্গই, যদি অবশ্য তা স্ফটিকের অভ্যন্তরস্থ পরমাণুগুলির দ্বারা যথেষ্ট

পরিমাণে বিচ্ছুরিত হতে পারে, ঐ স্ফটিকের ভিতর দিয়ে যাবার সময় ব্যতিচার ক্রিয়ার সৃষ্টি করবে। স্বল্প তরঙ্গদৈর্ঘ্য বিশিষ্ট তরঙ্গগুলির মধ্যে ইলেকট্রন এবং নিউট্রন পদার্থতরঙ্গ, রঞ্জনরশ্মি এবং পরমাণুকেন্দ্রীননিঃসৃত গামারশ্মি এই ধরণের স্ফটিক ব্যতিচার সৃষ্টি করে। লাউয়ে ব্যতিচারের গাণিতিক বিশ্লেষণ অপেক্ষাকৃত কঠিন, তবে পরবর্তীকালে বিজ্ঞানী ব্র্যাগ (Bragg) একটি সহজতর উপায়ে স্ফটিক ব্যতিচারের মূল নীতিটি বিশ্লেষণ করেন, আমরা এখানে ব্র্যাগের পদ্ধতি অনুসরণ ক'রে এই ব্যতিচারের সংক্ষিপ্ত বিবরণ দেব।

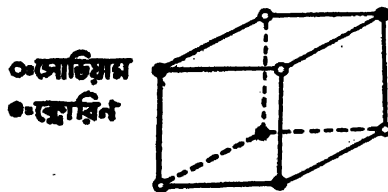
একটি স্ফটিক সমতল যার ভিতর প্রতি বর্গায়তন পিছু পরমাণুর সংখ্যা খুবই অধিক, এর ভিতর থেকে তরঙ্গের প্রতিবিম্বন ঘটার প্রক্রিয়া হায়গেন্সের নীতি অনুসরণ ক'রেই ব্যাখ্যা করা যায়, তবে বর্তমান ক্ষেত্রে একটিমাত্র সমতলের পরিবর্তে পাশাপাশি বিভিন্ন গভীরতায় অবস্থিত বহুসংখ্যক সমতলের ভিতর থেকে প্রতিবিম্বন ঘটছে এমন বিচার করতে হবে। 3·4 চিত্রে স্ফটিকের ভিতর ত্রিমাত্রিক পরমাণুসজ্জার একটি দ্বিমাত্রিক প্রস্থচ্ছেদ দেখান হয়েছে। চিত্রে ক্ষুদ্র বৃত্তগুলি পাশাপাশি থেকে নির্দেশ করছে কতগুলি সমান্তরাল স্ফটিক সমতল, বিভিন্ন গভীরতায় অবস্থিত। ব্র্যাগের বিশ্লেষণ অনুসারে অন্তর্গমনক্ষম তরঙ্গগুলি স্ফটিকের ভিতর এইরকম বহুসংখ্যক পরস্পর সমান্তরাল পরমাণুস্তরের ভিতর থেকে প্রতিবিম্বিত হয়। ধরা যাক X Y Z একটি

চিত্র 3·4
স্ফটিকের ভিতর থেকে রঞ্জনরশ্মির ব্যতিচার।

অগ্রসরমাণ তরঙ্গসম্মুখ (wave-front), আপতিত তরঙ্গের মধ্যে দুটি রশ্মি হ'ল যথাক্রমে XK এবং YO এবং এরা প্রতিবিম্বনশীল সমতলগুলির সঙ্গে θ নিরীক্ষণ কোণে অগ্রসর হয়। উভয় রশ্মি যখন O বিন্দুতে এসে পৌঁছায় তখন Y থেকে একটির ভ্রমণপথের দূরত্ব YO, X থেকে ঐ দূরত্ব হবে

$$XK + KO = XK + KM = XL + LM$$
$$= YO + 2d \sin \theta$$

d, দুটি পাশাপাশি অবস্থিত সমতলের মধ্যে ব্যবধান। সুতরাং প্রাথমিক তরঙ্গসমূহের দুই অংশের মধ্যে পথের পার্থক্য হ'ল $2d \sin\theta$ এবং যদি তা হয় তরঙ্গদৈর্ঘ্যের কোন অখণ্ডসংখ্যক গুণক তাহলে KOP দিকে তরঙ্গদ্বয় একত্রিত হয়ে গঠনাত্মক ব্যতিচার সৃষ্টি ক'রে প্রতিবিম্বিত ধারার তীব্রতা বৃদ্ধি করে। উপরোক্ত সর্ত্ত পালিত নাহলে, ধ্বংসাত্মক ব্যতিচারের ফলে KOP দিকে তীব্রতা হবে অনেক কম। সুতরাং যখন

$$2d \sin\theta = n\lambda \;;\; n = 1, 2, \cdots\cdots \qquad \cdots \quad 3\cdot14$$

তখনই শুধু গঠনাত্মক ব্যতিচার সৃষ্টি হবে। 3·14 সূত্রটিকে বলা হয় ব্র্যাগ সূত্র, $n=1$ হলে বলা হয় প্রথম সর্ত্তের চরমাবস্থা, $n=2$ হলে দ্বিতীয় সর্ত্তের চরমাবস্থা, ইত্যাদি। 3·8 চিত্রে যাবতীয় পরমাণুস্তরগুলির মধ্যে শুধু দুটি মাত্র স্তর থেকে তরঙ্গের বিচ্ছুরণ দেখান হয়েছে, কিন্তু স্বল্প তরঙ্গদৈর্ঘ্য বিশিষ্ট তরঙ্গগুলি স্ফটিকের ভিতর সহজেই অনেকগুলি স্তর পর্যন্ত অগ্রসর হতে পারে এবং একই নিরীক্ষণ কোন θ-তে আপতিত রশ্মিগুলির জন্য যেকোন পাশাপাশি দুটি স্তর থেকে বিচ্ছুরণের ক্ষেত্রেই 3·14 সম্বন্ধটি প্রযোজ্য অর্থাৎ এই সর্ত্তটি পালিত হলে যাবতীয় স্তরগুলি থেকে বিচ্ছুরিত রশ্মিগুলি একত্রিত হয়ে একযোগে গঠনধর্ম্মী ব্যতিচারের সৃষ্টি করবে। এই কারণে যেসব কোণে গঠনধর্ম্মী ব্যতিচার ঘটে সেখানে বিচ্ছুরিত তরঙ্গের তীব্রতা হয় খুবই বেশী, অন্যান্য অবস্থায় তীব্রতার পরিমাণ নগণ্য থাকে। স্ফটিকের ভিতর দিয়ে বিচ্ছুরিত রঞ্জনরশ্মি বা ইলেকট্রন প্রবাহের ক্ষেত্রে তীব্রতার এই তীক্ষ্ণ হ্রাসবৃদ্ধি লক্ষিত হয়েছে এবং এভাবেই স্ফটিক ব্যতিচার ক্রিয়ার বাস্তবতা নিঃসন্দেহে প্রমাণিত হয়।

চিত্র 3·9

সোডিয়ামের ক্লোরাইড স্ফটিকের ভিতর সোডিয়াম ও ক্লোরিণ পরমাণুর সজ্জা। এইরকম একক চৌপলগুলি পরস্পরের উপর ন্যস্ত থেকে সমগ্র স্ফটিকটি গড়ে তোলে।

ব্র্যাগের উপরিলিখিত সমীকরণটি অনেকটা একটি সাধারণ জালির দ্বারা সৃষ্ট ব্যতিচারের সমীকরণের অনুরূপ কিন্তু তার সঙ্গে এটিকে অভিন্ন মনে করা

ভিন্ন হবে, কারণ ব্র্যাগের সমীকরণে θ হল নিরীক্ষণ কোণ বা আপতিত রশ্মি পরমাণুস্তরের সমতলের সঙ্গে সৃষ্টি করে, কিন্তু জালির-ক্ষেত্রে θ হ'ল আপতন কোণ অর্থাৎ আপতিত রশ্মি ও আপতন বিন্দুতে জালির সমতলের উপর লম্ব এদের দুই-এর ভিতর যে কোণ সৃষ্টি হয়।

পূর্বেই বলা হয়েছে যে যদি তরঙ্গদৈর্ঘ্যের মান d-এর নিকটবর্তী হয় তবেই এই ধরণের ব্যতিচার প্রক্রিয়া সহজে লক্ষ্য করা সম্ভব হবে। সাধারণ লবণের (NaCl) স্ফটিকের ভিতর নিকটতম পরমাণুগুলি একটি একক ঘন চৌপলের শীর্ষবিন্দুগুলিতে অবস্থান করে যেমন 3·9 চিত্রে দেখান হয়েছে, একটি সম্পূর্ণ স্ফটিক এইরকম সারি সারি পাশাপাশি সাজান ঘন-চৌপলের সমন্বয়ে গঠিত, সুতরাং এক্ষেত্রে স্ফটিকের জালিপ্রসারের পরিমাণ একক ঘনচৌপলের একটি বাহুর সমান এবং এর পরীক্ষালব্ধ পরিমাণ হ'ল

$$d = 2{\cdot}814 \times 10^{-8} \text{ সেণ্টিমিটার (} 18^{\circ} \text{ সেণ্টিগ্রেড তাপমাত্রায়)}$$

এর সঙ্গে তুলনা করা যেতে পারে সোডিয়ামের হলুদ আলোর (D রেখার) তরঙ্গদৈর্ঘ্য

$$\lambda = 5893 \times 10^{-8} \text{ সেণ্টিমিটার}$$

যা d-এর তুলনায় হাজার গুণ অধিক, সুতরাং এই আলোতে ব্র্যাগ ব্যতিচার লক্ষ্য করা সম্ভব নয়। কোনও দৃশ্য আলো, এমনকি অপেক্ষাকৃত স্বল্প তরঙ্গদৈর্ঘ্যের বেগুনীপারের আলোর সাহায্যেও স্ফটিক ব্যতিচার লক্ষ্য করা সম্ভব হয় না। 3·3 চিত্রের সারণীটি বিচার করলে দেখা যায় যে রঞ্জনরশ্মির তরঙ্গদৈর্ঘ্য উপরোক্ত d-এর তুলনায় অনেক কম হতে পারে সুতরাং ঐ রশ্মিতে স্ফটিক ব্যতিচার ঘটবে এমন আশা করা যায়। তেমনি পদার্থের ডিব্রগলি তরঙ্গের দ্বারাও স্ফটিক ব্যতিচার লক্ষ্য করা সম্ভব। ইলেকট্রনের ডিব্রগলি তরঙ্গের কথা ধরা যাক; যদি একটি ইলেকট্রনকে V ভোল্ট বিভব ব্যবধানের মধ্য দিয়ে ত্বরিত করা যায় তবে এর গতিশক্তি ও ভরবেগ হবে যথাক্রমে

$$E = \tfrac{1}{2}mv^2 = Ve$$

$$p = mv = \sqrt{2mVe}$$

সুতরাং তখন এর ডিব্রগলি তরঙ্গদৈর্ঘ্য হবে

$$\lambda = \frac{h}{mv} = \frac{h}{\sqrt{2mVe}} \quad \cdots \quad 3{\cdot}15$$

যদি V = 10,000 ভোল্ট হয় তবে

$$\lambda = \frac{6.67\times10^{-27}}{\sqrt{2\times(0.9\times10^{-27})\times10{,}000\times1.6\times10^{-12}}}$$
$$= 0.124\ A^\circ$$

এবং এই ইলেকট্রন তরঙ্গের দ্বারা স্ফটিক ব্যতিচার সহজেই ঘটান সম্ভব।

অপেক্ষাকৃত স্বল্প শক্তিতেই ইলেকট্রনের গতিবেগ আপেক্ষিকতা স্তরের পরিমাণে পৌঁছে যায় এবং ঐসকল শক্তিতে ডিব্রগলি সূত্রটি লিখতে হলে আপেক্ষিকতার সূত্রসমূহ ব্যবহার করা প্রয়োজন। আপেক্ষিকতা তত্ত্ব অনুসারে

$$eV = \text{গতিশক্তি} = E - m_0c^2 = \sqrt{(pc)^2 + (m_0c^2)^2} - m_0c^2 \quad \cdots \quad 3.16$$

এখানে, $p = mv/\sqrt{1-v^2/c^2}$, ইলেকট্রনের ভরবেগ।

ডিব্রগলি সূত্র থেকে $p = \dfrac{h}{\lambda}$ এবং এই রাশি 3.16 সমীকরণে প্রয়োগ করলে আমরা পাই

$$(eV + m_0c^2)^2 = \frac{h^2c^2}{\lambda^2} + (m_0c^2)^2$$

অথবা

$$\lambda = \frac{hc}{\sqrt{eV(eV + 2m_0c^2)}} \quad \cdots \quad \cdots \quad 3.17$$

অধিকতর ইলেকট্রনের শক্তিতে এই সূত্রটি নিয়ে অনেক পরীক্ষা করা হয়েছে এবং এর সত্যতা নিশ্চিতভাবে প্রমাণিত হয়েছে, তবে ইলেকট্রনের শক্তি আপেক্ষিকতাস্তরের নীচে (< 10 কিলোইভি) থাকলে 3.15 সূত্রটিও নির্ভুল ফলাফল দিয়ে থাকে।

রঞ্জনরশ্মি বর্ণালী মাপনী (X-ray spectrometer)

উপরোক্ত রঞ্জনরশ্মি ব্যতিচারের নীতি অনুসরণ ক'রে ব্র্যাগ একটি বর্ণালী মাপনীর সরল আয়োজন উদ্ভাবন করেন যার সাহায্যে সহজেই রঞ্জনরশ্মির তরঙ্গদৈর্ঘ্য নির্ণয় করা যায়। যেহেতু অনুরূপ পদ্ধতিতে পদার্থ-তরঙ্গের তরঙ্গদৈর্ঘ্যও নির্ণয় করা সম্ভব এজন্য আমরা এখানে ঐ পদ্ধতির একটি সংক্ষিপ্ত বিবরণ দেব। 3.10 (a) চিত্রে আয়োজনটি দেখান হয়েছে, একটি রঞ্জনরশ্মি টিউবের মধ্যে ধাতবহ A থেকে রঞ্জনরশ্মি উৎপন্ন হয়, রশ্মি-প্রবাহকে দুটি ফাঁক B ও B′-এর সাহায্যে সঙ্কীর্ণ করা হয়, তারপর ঐ রশ্মি C স্ফটিকের উপর এসে পড়ে। এই স্ফটিকটি বর্ণালী মাপনীর টেবিলের উপর

বসান থাকে এবং এর কৌণিক অবস্থান আঁশরার মাপনী V-এর দ্বারা স্থির করা যায়। প্রতিবিম্বিত রশ্মি ফাঁক F-এর ভিতর দিয়ে এসে একটি আয়নী-ভবন কক্ষ* E-এর উপর আপতিত হয় যেটি বর্ণালী মাপনীর D বাহুর সঙ্গে আটকান থাকে। $\theta = 0$ থেকে শুরু ক'রে প্রথমে স্ফটিক তারপর আয়নীভবন কক্ষটিকে ক্রমাগত ঘোরান হয়, যদি স্ফটিকের ঘূর্ণন হয় θ তবে D-এর ঘূর্ণন হতে হবে 2θ এবং প্রতিক্ষেপেই মোট আয়নীভবনের পরিমাণ মাপা হয়। আয়নীভবন বনাম নিরীক্ষণ কোণ θ-এর লেখ অঙ্কন করলে সাধারণতঃ 3·10 (b) চিত্রে প্রদত্ত লেখটির অনুরূপ একটি লেখ পাওয়া যায়। θ যত বৃদ্ধি পায় ততই আয়নীভবনের গড় পরিমাণ হ্রাস পেতে থাকে কিন্তু বিশেষ বিশেষ কোণে যা লেখটির ভিতর A_1, B_1 ইত্যাদি বিন্দুর দ্বারা বোঝান হয়েছে, লেখটিতে চরমাবস্থা বা শিখর লক্ষিত হয়। এক্ষেত্রে A_1, B_1 শিখরদ্বয় সৃষ্টি হয়েছে প্রথম সর্গের প্রতিবিম্বনের দ্বারা ($n=1$), A_2, B_2 ও A_3, B_3 যথাক্রমে দ্বিতীয় ও তৃতীয় সর্গের প্রতিবিম্বনের দ্বারা সৃষ্টি হয়। প্রথম ও দ্বিতীয় সর্গের বর্ণালী বোঝা যায় এভাবে যে দুটি চরমাবস্থার পরস্পরের উচ্চতার অনুপাত A_1, B_1 এবং A_2, B_2 অবস্থায় সমান থাকে যদিও উচ্চতর সর্গে গিয়ে প্রতিটি শিখরের তীব্রতা দ্রুত হ্রাস পায়। এছাড়া উচ্চতর সর্গে গিয়ে শিখরদ্বয়ের পরস্পরের মধ্যে দূরত্বও ক্রমান্বয়ে বৃদ্ধি পায়। কোন একটি পরীক্ষায় ধরা যাক একটি বিশেষ শিখর তিনটি বিভিন্ন সর্গে নিম্নলিখিত কোণগুলিতে দৃষ্ট হয়

$$\theta_1 = 11{\cdot}8^\circ,\ \theta_2 = 23{\cdot}6^\circ,\ \theta_3 = 38^\circ$$

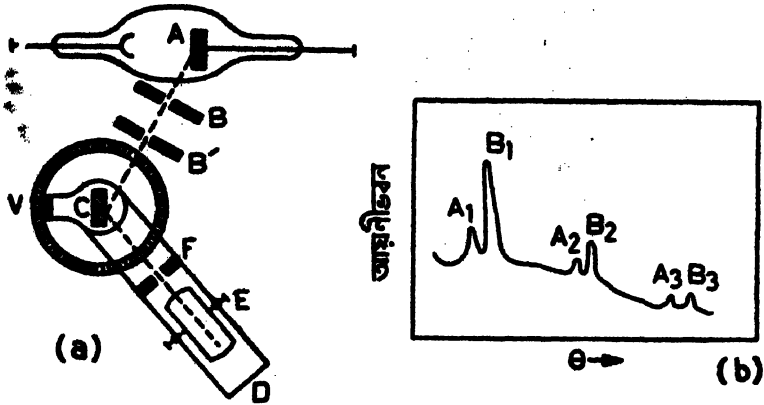
এবং যেহেতু

$$\sin 11{\cdot}8 : \sin 23{\cdot}6 : \sin 38 = 0{\cdot}204 : 0{\cdot}40 : 0{\cdot}615$$
$$= 1 : 2 : 3 \text{ (প্রায়)}$$

সুতরাং স্পষ্টতঃ এক্ষেত্রে $\dfrac{\lambda}{2d} = \dfrac{\sin\theta}{n}$ সমীকরণটি পালিত হচ্ছে বোঝা যায়।

কিরকম বর্ণালী উৎপন্ন হচ্ছে তা অবশ্য নির্ভর করে A ধাতবহটির প্রকৃতির উপর কারণ রঞ্জনরশ্মি টিউব থেকে সবসময়ই ধাতবহের বিশেষ বৈশিষ্ট্য সমন্বিত বর্ণালীই উৎপন্ন হয়। সাধারণতঃ বর্ণালীতে স্পন্দনাঙ্কের সন্তত বিতরণের উপর আরোপিত একাধিক পৃথক পৃথক শিখর লক্ষিত হয়, যেমন 3·10 (b) চিত্রে দেখান হয়েছে। রঞ্জনরশ্মির বিকিরণ পদ্ধতি সম্বন্ধে ষষ্ঠ অধ্যায়ে বিস্তৃতভাবে আলোচনা করা হবে। যদি ব্যতিচারী স্ফটিকটি

* অষ্টম অধ্যায় দ্রষ্টব্য।

পরিবর্তিত ক'রে দেওয়া যায় তবে d-এর মানও বদলে যাবে এবং ঐ একই শিখরগুলি তখন নূতন নূতন কোণে দৃষ্ট হবে। বর্তমানে রুলড করা জালির সাহায্যে রঞ্জনরশ্মির তরঙ্গদৈর্ঘ্যের মান অতি নির্ভুলভাবে মাপা যায় এবং তার সাহায্যে কোন একটি স্ফটিকের ক্ষেত্রে d-এর পরিমাণ নির্ণয় করা যায়। এইভাবে d-এর মান নির্ণীত হলে তারপর বর্তমান পদ্ধতির প্রয়োগে অপরাপর রঞ্জনরশ্মির তরঙ্গদৈর্ঘ্য মাপা সম্ভব।

চিত্র 3·10

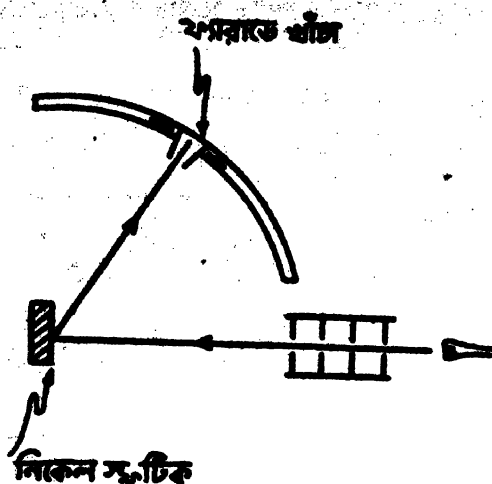
(a) একটি সরল রঞ্জনরশ্মি বর্ণালী মাপনীর আয়োজন ; (b) এর সাহায্যে প্রাপ্ত রঞ্জনরশ্মির আয়নীভবন লেখ।

ডেভিসন এবং জারমারের (Davisson and Germer) পরীক্ষা

ইলেকট্রনের তিরগলি তরঙ্গের অস্তিত্ব প্রথম নিশ্চিতভাবে প্রমাণ করেন ডেভিসন এবং জারমার। এঁদের পরীক্ষার নীতি ব্র্যাগ রঞ্জনরশ্মি বর্ণালী মাপনীর আয়োজনের অনুরূপ (চিত্র 3·11)। একটি উত্তপ্ত ধাতুর কুণ্ডলীর ভিতর তাপবিদ্যুৎ প্রক্রিয়ার দ্বারা ইলেকট্রন উৎপন্ন করা হয় এবং তারপর শূন্যের ভিতর নির্দিষ্ট বিভব ব্যবধানের প্রয়োগের দ্বারা এদের ত্বরিত করা হয় এবং দুটি সঙ্কীর্ণ ফাঁকের ভিতর দিয়ে অগ্রসর হবার ফলে এরা একটি সরু সরলরৈখিক প্রবাহে পরিণত হয়। ত্বরিত ইলেকট্রনগুলিকে এরপর একটি বিশুদ্ধ নিকেল ধাতুর স্ফটিকের ব্যতিচারী সমতলের উপর এনে ফেলা হয়। এই পরীক্ষায় ইলেকট্রনগুলিকে 30 থেকে 300 ভোল্ট বিভব ব্যবধানে ত্বরিত করা হয়েছিল। নিকেল স্ফটিকের ব্যতিচারী সমতলগুলি থেকে বিচ্ছুরিত ইলেকট্রনগুলিকে এবার একটি বিদ্যুৎবিনিময়রহিত (insulated) ফ্যারাডে সিলিণ্ডারের ভিতর সংগ্রহ ও পরিমাপ করা হয়। এই সিলিণ্ডারটির সঙ্গে একটি অত্যন্ত স্পর্শকাতর গ্যালভানোমিটার যুক্ত থাকে যার দ্বারা ইলেকট্রন

যাবার বৈদ্যুতিক প্রবাহ নির্দেশিত হয় এবং এভাবে বিক্ষুরিত ইলেকট্রন প্রবাহের তীব্রতা নির্ণয় করা যায়। ফ্যারাডে খাঁচাটি এমন বিভবে রাখা হয় যেন এতে যেসব ইলেকট্রনগুলি এদের প্রাথমিক শক্তির $\frac{1}{10}$-এর অধিক শক্তি কম ক'রে ক্যাজে সেগুলি সংগৃহীত না হয়।

চিত্র 3·11

ডেভিসন ও জারমারের পরীক্ষার আয়োজন।

পরীক্ষায় ত্বরক বিভবের মান ধ্রুব রেখে ফ্যারাডে খাঁচাটিকে বিভিন্ন কোণে ঘুরিয়ে বিক্ষুরিত ইলেকট্রন প্রবাহের তীব্রতা বিক্ষুরণ কোণের অপেক্ষক হিসাবে মাপা হয়, বিভিন্ন ত্বরক বিভবের জন্য একই প্রক্রিয়ার পুনরাবৃত্তি করা হয়।

পরীক্ষায় দেখা যায় যে স্ফটিকটির উপর বিশেষ বিশেষ বিক্ষুরণ কোণে বিক্ষুরিত ইলেকট্রন প্রবাহের তীব্রতা যথেষ্ট অধিক হয় এবং অন্যান্য কোণে ঐ তীব্রতা হয় তুলনামূলকভাবে কম। ডেভিসন ও জারমারের এই পরীক্ষা যুক্তিসঙ্গতভাবে বিশ্লেষণ করা যায় যদি ধরা হয় বিভিন্ন পাশাপাশি সমান্তরাল ব্যতিচারী সমতলগুলি থেকে বিক্ষুরিত ইলেকট্রন তরঙ্গের ব্যতিচারের ফলেই দৃষ্ট ঘটনাগুলির উদ্ভব হচ্ছে, অর্থাৎ ঠিক যেভাবে ব্র্যাগ প্রতিবিম্বন ঘটে থাকে। জ্ঞাত তরঙ্গদৈর্ঘ্যের রঞ্জনরশ্মির সাহায্যে পরীক্ষা ক'রে সহজেই নিকেল স্ফটিকের জালিপ্রসার d-এর পরিমাণ নির্ণয় করা যায় এবং তারপর ব্র্যাগ সমীকরণ ব্যবহার করলে তাথেকে λ-এর মান নির্ধারিত হয়। দেখা যায় যে এভাবে প্রাপ্ত তরঙ্গদৈর্ঘ্যের মান 3·15 সমীকরণে প্রদত্ত মানের সঙ্গে সামঞ্জস্যপূর্ণ, তবে স্ফটিকের ভিতর ইলেকট্রন তরঙ্গের প্রতিসরণের জন্য কিছু শুদ্ধীকরণ প্রয়োগের প্রয়োজন হয়।

স্ফটিকচূর্ণের ব্যাতিচার

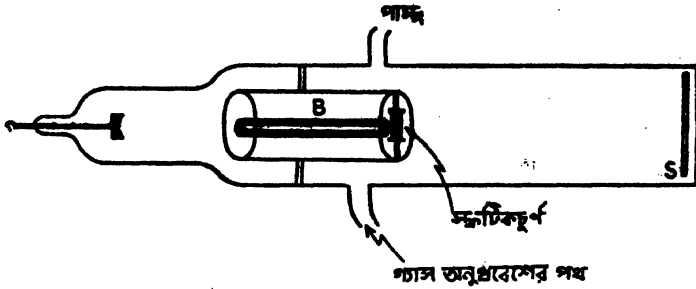
এপর্যায়ে যে স্ফটিক ব্যাতিচারের বিষয় বলা হয়েছে তাতে শুধু একটি একক অখণ্ড স্ফটিকের ভিতর থেকে প্রতিবিম্বন ঘটছে এমন ধরে নেওয়া হয়েছে, কিন্তু একটি অখণ্ড স্ফটিকের বদলে কিছু স্ফটিকচূর্ণ ব্যবহার ক'রেও ব্যাতিচার ক্রিয়া লক্ষ্য করা সম্ভব। "স্ফটিকচূর্ণ" হ'ল আসলে একই প্রকারের অসংখ্য অতি ক্ষুদ্র ক্ষুদ্র স্ফটিকের সমাবেশ। এইসব ক্ষুদ্র ক্ষুদ্র স্ফটিকের ভিতরেও পরমাণুগুলি স্তরে স্তরে পরস্পর সমান্তরাল সমতলে সাজান থাকে এবং আপতিত তরঙ্গের বিচ্ছুরণ ও ব্যাতিচার ঘটাতে পারে। চূর্ণের ভিতর এইসব ক্ষুদ্র স্ফটিকগুলির ব্যাতিচারী সমতলগুলি সম্পূর্ণ অনিয়ন্ত্রিতভাবে যেকোন কোণে নত থাকতে পারে। কিছুসংখ্যক স্ফটিক সবসময়ই থাকে যেগুলির মধ্যে কোন একটি বিশেষ স্তরশ্রেণী ব্র্যাগ প্রতিবিম্বন ঘটাবার মতো উপযুক্ত কোণে অবস্থান করে এবং স্পষ্টতঃই রঞ্জনরশ্মির আপতন পথের উপর চতুর্দ্দিকেই নির্দ্দিষ্ট কোণে ব্র্যাগ প্রতিবিম্বন ঘটাবার মতো এইরকম বহুসংখ্যক ক্ষুদ্র স্ফটিকের উপস্থিতি থাকবে। মোট ফল হ'ল, একটিমাত্র স্ফটিকের দ্বারা ব্র্যাগ প্রতিবিম্বন ঘটলে যেখানে ফোটোগ্রাফীর প্লেটে একটি বিন্দুর সৃষ্টি হ'ত, এখন সেই বিন্দুটি একটি বৃত্তে পরিণত হবে। অর্থাৎ স্ফটিকচূর্ণ ব্যবহারের ফলে, প্রত্যেকটি ব্যাতিচারী স্তরশ্রেণী যা আপতিত রশ্মির সঙ্গে নির্দ্দিষ্ট নিরীক্ষণ কোণে অবস্থান করে, সেগুলি যেন সমান নিরীক্ষণ কোণ বজায় রেখে আপতিত রশ্মির গতিপথের চারপাশে 360° কোণে ঘুরে যায় এবং এজন্য পূর্ব্বে যেখানে ফোটোগ্রাফীর পাতের উপর একটিমাত্র বিন্দু সৃষ্টি হ'ত, সেখানে একটি বৃত্তের সৃষ্টি হয়।

স্ফটিকচূর্ণ ব্যাতিচার পদ্ধতিতে আপতিত রশ্মির চতুষ্পার্শ্ব ঘিরে এক-একটি শঙ্কুর তলের বরাবর ব্র্যাগ সর্ত্ত পালিত হয় এবং এইসব শঙ্কুগুলির প্রস্থচ্ছেদ হিসাবে ফোটোগ্রাফীর প্লেটের উপর সারি সারি বৃত্তের ছবি ফুটে ওঠে। বিভিন্ন বৃত্তগুলি সৃষ্টি হবার কারণ মূলতঃ দুটি। প্রথমতঃ এরা সৃষ্টি হয় স্ফটিকচূর্ণের ভিতর বিভিন্ন স্তরশ্রেণীর মধ্য থেকে বিচ্ছুরণ ঘটার দরুণ, ঐসব বিভিন্ন স্তরশ্রেণীর প্রত্যেকের জালিপ্রসার বিভিন্ন। দ্বিতীয়তঃ, আপতিত রশ্মির মধ্যে একাধিক তরঙ্গদৈর্ঘ্যের অবস্থিতি অথবা চূর্ণের ভিতর একাধিক প্রকারের স্ফটিকের উপস্থিতির ফলেও বিভিন্ন বৃত্তের সৃষ্টি হতে পারে। এমন অনেক স্ফটিক আছে যেগুলি শুধু চূর্ণ হিসাবেই পাওয়া যায়, এজন্য এই চূর্ণ পদ্ধতি ঐসব স্ফটিকের গঠন নির্দ্ধারণের পরীক্ষার জন্য অপরিহার্য্য। এই প্রকার ব্যাতিচার ক্রিয়া লক্ষ্য করতে হলে অত্যধিক মিহি চূর্ণ ব্যবহার করা

প্রয়োজন। ইলেকট্রন পদার্থতরঙ্গ ব্যবহার ক'রেও চূর্ণ ব্যতিচার ক্রিয়া লক্ষ্য করা সম্ভব এবং ডেভিসন ও জারমারের পরীক্ষার অব্যবহিত পরেই জি. পি. টমসন এই পদ্ধতিতে ইলেকট্রন তরঙ্গের ব্যতিচার লক্ষ্য করেন। চূর্ণ ব্যতিচার পদ্ধতিকে [একে ডিবাই-সিয়ার (Debye-Sherrer) পদ্ধতিও আখ্যা দেওয়া হয়] ইলেকট্রন-তরঙ্গের ব্যতিচার লক্ষ্য করা অপেক্ষাকৃত কঠিন কারণ সচরাচর লভ্য রঞ্জনরশ্মির তুলনায় ইলেকট্রন তরঙ্গদৈর্ঘ্য সাধারণতঃ প্রায় 20 গুণ কম এবং এজন্য ব্র্যাগ প্রতিবিম্বন কোণগুলির মানও তদনুপাতে কম। এছাড়া পদার্থের ভিতর ইলেকট্রন তরঙ্গের শোষণ রঞ্জনরশ্মির তুলনায় অনেক বেশী এজন্য এই পরীক্ষায় অত্যন্ত পাতলা স্ফটিকচূর্ণের ফিলম এবং তীব্র শক্তিসম্পন্ন ইলেকট্রন প্রবাহ ব্যবহার করা প্রয়োজন হয় যাতে ইলেকট্রনের শক্তির হ্রাসন খুব নগণ্য থাকে।

জি. পি. টমসনের (G. P. Thomson) পরীক্ষার আয়োজন 3·12 চিত্রে দেখান হয়েছে, একটি ঠাণ্ডা ক্যাথোড-মোক্ষণ টিউবের মধ্যে ইলেকট্রন উৎপন্ন করা হয় এবং ধন-বিদ্যুৎধারক ও ঋণ-বিদ্যুৎধারকের মধ্যে বিভব ব্যবধান 10 থেকে 60 কিলোভোল্ট পর্যন্ত পরিবর্তন করা যায়। মোক্ষণ টিউবের ভিতর থেকে একটি ইলেকট্রনের ধারা একটি খুব সরু টিউব B-এর ভিতর দিয়ে (ব্যাস 0·25 মিলিমিটার, দৈর্ঘ্য 6 সেমি) অতিক্রান্ত হয়ে একটি উচ্চ শূন্যতায় বিদ্যমান বৃহৎ প্রকোষ্ঠের ভিতর প্রবেশ করে। B টিউবটি একটি নরম লোহার (soft iron) সিলিণ্ডার দ্বারা বেষ্টিত থাকে যা চৌম্বকক্ষেত্রের প্রভাব রোধ করার পর্দা হিসাবে কাজ করে। একটি অত্যন্ত পাতলা স্ফটিকচূর্ণের ফিলম B টিউবের শেষপ্রান্তে লাগান থাকে এবং এই ফিলমের ভিতর দিয়ে নির্গত ইলেকট্রনগুলি অবশেষে একটি দীপনশীল পর্দা S-এর উপর এসে আপতিত হয় যা ফিলম থেকে 30 সেমি দূরে থাকে। ফিলমের যে পুরুত্বে ব্যতিচার ক্রিয়া সুসম্পন্ন হয় তা প্রায় $10^{-6} \sim 10^{-5}$ সেমি এবং এরকম ফিলম উৎপন্ন করা বিশেষ কষ্টসাধ্য। রূপা ইত্যাদি কতগুলি ধাতুর গ্যাসীয় অবস্থা থেকে ঠাণ্ডা ক'রে পরমাণুগুলিকে প্রলেপের আকারে জমিয়ে বিশেষ জটিল পদ্ধতিতে এত পাতলা ফিলম উৎপন্ন করা সম্ভব হয়েছিল।

যে ব্যতিচার আকৃতি এভাবে পাওয়া যায় তা হ'ল একটি কেন্দ্রীয় অত্যন্ত উচ্চ তীব্রতাসমন্বিত দাগ এবং এটিকে ঘিরে কতগুলি অভিন্নকেন্দ্রীক বৃত্ত ঠিক যেমন রঞ্জনরশ্মির ডিবাই-সিয়ার ব্যতিচারে লক্ষ্য করা যায়। সমস্ত ব্যতিচার প্যাটার্নটি চৌম্বকক্ষেত্রের প্রয়োগে পর্দার উপর বিচ্যুত করা

যায় এবং এথেকে নিশ্চিত হওয়া যায় যে ওটি ইলেকট্রন তরঙ্গের দ্বারাই সৃষ্টি হচ্ছে। জি. পি. টমসন পরীক্ষার দ্বারা প্রমাণ করেন যে, যদি ইলেকট্রনের তরঙ্গদৈর্ঘ্য ডিব্রগলি সমীকরণের দ্বারা প্রদত্ত হয় তবে এর দ্বারা অ্যালুমিনিয়াম, সোনা ও প্ল্যাটিনাম ফিলমের মধ্য থেকে উৎপন্ন ব্যাতিচার প্যাটার্ণ, রঞ্জনরশ্মির পরীক্ষা থেকে প্রাপ্ত ঐসব মৌলের স্ফটিকের জালিপ্রসারের পরিমাণের সঙ্গে সামঞ্জস্যপূর্ণ।

চিত্র 3·12
জি. পি. টমসনের পরীক্ষা।

ইলেকট্রন অণুবীক্ষণ

খুব ছোট জিনিষকে বড় ক'রে দেখাবার জন্য অণুবীক্ষণ যন্ত্র ব্যবহৃত হয়। দুটি খুব নিকট বিন্দুকে পৃথক ক'রে দেখাবার ক্ষমতাকে বলা হয় অণুবীক্ষণের বিশ্লিষ্টকরণ ক্ষমতা এবং এই ক্ষমতা মাপা হয় ঐ বিন্দুদ্বয়ের পরস্পরের মধ্যে নিকটতম দূরত্বের পরিমাপে, যে ন্যূনতম দূরত্বে এদের পৃথক হিসাবে দেখা যায়। বিশ্লিষ্টকরণ ক্ষমতা নির্ভর করে অণুবীক্ষণ যন্ত্রে কত তরঙ্গদৈর্ঘ্যের আলো ব্যবহার করা হয় তার উপর, তরঙ্গদৈর্ঘ্য যত ছোট হবে বিশ্লিষ্টকরণ ক্ষমতা হবে তত বেশী। এই হেতু দৃশ্য আলোর তুলনায় বেগুনীপারের আলোতে বিশ্লিষ্টকরণ ক্ষমতা হয় অনেক বেশী, কিন্তু যেহেতু বেগুনীপারের আলোতে পদার্থ দৃষ্টিগোচর হয় না এজন্য কোন ধরণের প্রদীপক পদার্থের পর্দা এই ধরণের অণুবীক্ষণের প্রতিবিম্ব গঠনের জন্য ব্যবহৃত হয়। সর্ব্বাধিক বিশ্লিষ্টকরণ ক্ষমতা পাওয়া সম্ভব হ'ত যদি রঞ্জনরশ্মিকে অণুবীক্ষণ যন্ত্রে আলো হিসাবে ব্যবহার করা সম্ভব হ'ত, কিন্তু এ পর্য্যন্ত কোন আতস বা আয়নার দ্বারা রঞ্জনরশ্মিকে ফোকাস করা সম্ভব হয়নি, এজন্য রঞ্জনরশ্মিতে প্রতিবিম্ব গঠন করা অসম্ভব। কিন্তু ইলেকট্রনের ডিব্রগলি তরঙ্গকে একাজে ব্যবহার করা সম্ভব এবং এ পদ্ধতি প্রয়োগ ক'রে একরকম অণুবীক্ষণ যন্ত্র তৈরী হয়েছে যার বিশ্লিষ্টকরণ

ক্ষমতা সাধারণ আলোর ব্যবহৃত অণুবীক্ষণের চেয়ে বহুগুণ বেশী। ইলেকট্রন তরঙ্গ ব্যবহারের সুবিধা হ'ল এই যে, বৈদ্যুতিক ও চৌম্বকক্ষেত্রের প্রভাবে ইলেকট্রনকে বাঁকান যায় এবং বিশেষভাবে বিন্যস্ত চৌম্বকক্ষেত্র ঠিক আতসের মতই একটি ইলেকট্রনের ধারাকে ফোকাস করতে পারে। ইলেকট্রন অণুবীক্ষণে ব্যবহারের জন্য পরীক্ষাধীন পদার্থকে একটি অতিশয় পাতলা আস্তরণের আকারে তৈরী করা হয়, পরে একটি উচ্চশক্তি সমন্বিত ইলেকট্রনের ধারাকে এর ভিতর দিয়ে চালিত ক'রে দেওয়া হয়, নির্গত ইলেকট্রনের ভিন্নগলি তরঙ্গ একটি প্রতিবিম্ব বহন করে। এই প্রতিবিম্বকে তখন ঠিক সাধারণ আলোর তৈরী প্রতিবিম্বের মতই একাধিক বিদ্যুৎচুম্বকীয় আতসের সাহায্যে বর্দ্ধিত ও ফোকাস ক'রে একটি প্রদীপক পদার্থের পর্দার উপর নিক্ষেপ করা হয়। পর্দার উপর প্রদীপনের ফলে যে প্রতিবিম্ব ফুটে ওঠে তা কোন কোন আধুনিক যন্ত্রে পরীক্ষাধীন বস্তুর তুলনায় এক লক্ষ গুণেরও বেশী বড় হতে পারে। অণুবীক্ষণের বিশ্লিষ্টকরণ ক্ষমতা তাতে যে তরঙ্গ ব্যবহার করা হয় সেই তরঙ্গদৈর্ঘ্যের প্রায় সমান হয়। সুতরাং দৃশ্য আলোর ক্ষেত্রে তা হবে প্রায় $5000A^{\circ}$, ইলেকট্রন অণুবীক্ষণে বিশ্লিষ্টকরণ ক্ষমতা $10A^{\circ}$, কি এর চেয়েও কম সৃষ্টি করা সম্ভব হয়েছে।

ইলেকট্রন অণুবীক্ষণ বর্ত্তমানে নানা ধরণের গবেষণায় একটি অপরিহার্য্য যন্ত্র, বিজ্ঞানের বিভিন্ন শাখায় এর প্রয়োগ হয়েছে। ইলেকট্রন অণুবীক্ষণের সাহায্যেই সর্বপ্রথম ভাইরাসের ছবি তোলা এবং এর গঠন সম্বন্ধে জ্ঞানলাভ করা সম্ভব হয়। ইলেকট্রন অণুবীক্ষণ এবং এর পরবর্ত্তী সংস্করণ আয়ন অনুবীক্ষণের দ্বারা নানা অণুরও ছবি তোলা সম্ভব হয়েছে। এছাড়া কঠিন পদার্থের প্রকৃতি, স্ফটিকের গঠন প্রভৃতি বিষয়ে এই যন্ত্রটি আমাদের জ্ঞানের পরিধি অনেক বিস্তৃত করেছে।

তরঙ্গ-বলবিজ্ঞান এবং অনিশ্চয়তা (Wave mechanics & uncertainty)

পূর্ব্বের পরিচ্ছেদগুলিতে আমরা দেখলাম যে আলো এবং পদার্থকণার তরঙ্গ ও কণা উভয় প্রকৃতিই রয়েছে। কোন কোন পরীক্ষায় আলো তরঙ্গের মত ব্যবহার করে যেমন ব্যতিচার প্রক্রিয়া, প্রতিফলন, প্রতিসরণ ইত্যাদি; আবার আলোকবিদ্যুৎপ্রক্রিয়া ইত্যাদির ক্ষেত্রে আলোর ব্যবহার অনেকটা কণার মত, কারণ আমরা দেখেছি যে শোষিত আলোকশক্তিকে সেসব ক্ষেত্রে কতকগুলি কোয়াণ্টাম বা আলোককণার সমষ্টি হিসাবে কল্পনা

করতে হয় যাদের প্রত্যেকের নির্দ্দিষ্ট পরিমাণ শক্তি রয়েছে। তেমনি পদার্থ-কণাদের ক্ষেত্রেও, ওদের কণা প্রকৃতি প্রতিভাত হয় এদের জাড্যজনিত ভর, আধান ইত্যাদির অস্তিত্ব থেকে। কিন্তু আবার ডেভিসন ও জারমারের ব্যতিচার পরীক্ষায় ঐসব কণাগুলিই তরঙ্গের মত ব্যবহার করে। এখন প্রশ্ন হ'ল এই দ্বন্দ্বের সমাধান কি, একই বস্তু কিভাবে একবার কণা হিসাবে এবং আরেকবার তরঙ্গ হিসাবে ব্যবহার করে।

আধুনিক তরঙ্গ-বলবিজ্ঞানে (অথবা কোয়াণ্টাম বলবিজ্ঞান) এই প্রশ্নের সমাধান করেছে। এই নূতন বলবিজ্ঞানের তত্ত্ব অনুসারে আমরা কোন পদার্থকণা বা আলোককণার সম্ভাব্য গতিপ্রকৃতি ও অবস্থানের বিষয়ই শুধু সিদ্ধান্ত করতে পারি এবং পারমাণবিক জগতের ঘটনাবলীর শুধু এক ধরণের পরিসংখ্যানগত ব্যাখ্যা দেওয়াই সম্ভব। নিউটনীয় বলবিজ্ঞান অনুযায়ী যদি কোন নির্দ্দিষ্ট t সময়ে একটি কণার স্থানাঙ্ক (x, y, z) জানা থাকে তবে অপর নির্দ্দিষ্ট t' সময়ে এর স্থানাঙ্ক (x', y', z') সম্পূর্ণ নির্ভুলভাবে জানা সম্ভব যদি ঐ বলবিজ্ঞানের সূত্রগুলি কণাটির ক্ষেত্রে প্রয়োগ করা হয়। কিন্তু আধুনিক পরমাণুবিজ্ঞানের পরীক্ষা-নিরীক্ষার ভিত্তিতে নিউটনীয় বলবিজ্ঞানের এই দাবী গ্রাহ্য নয়, ঐসব বিভিন্ন পরীক্ষাগুলির একীকৃত এবং যথার্থ বিশ্লেষণ শুধু তরঙ্গ-বলবিজ্ঞানের ভিত্তিতেই দেওয়া সম্ভব এবং এই বলবিজ্ঞান অনুসারে কোন নির্দ্দিষ্ট সময়ে একটি কণার অবস্থানের সম্ভাব্য স্থানাঙ্ক কি হবে তাই শুধু গণনা ক'রে বলা যেতে পারে। তরঙ্গ-বলবিজ্ঞানে এইভাবে নিউটনীয় নির্দ্দিষ্টতার ধারণাকে সম্ভাব্যতার ধারণা দিয়ে বদল করা হয়েছে এবং এই সম্ভাব্যতার প্রস্তাবনা থেকেই পদার্থকণা ও আলোর দ্বৈতধর্ম্ম বিশ্লেষণ করা যায়। ধরা যাক ইলেকট্রন পদার্থতরঙ্গের ব্যতিচার প্রক্রিয়া ; কোন একটি স্ফটিকের পরমাণুগুলির ভিতর থেকে বিচ্ছুরিত হবার পর যখন ইলেকট্রনগুলি একটি ফোটোগ্রাফীর প্লেটের উপর এসে পড়ে তখন ঐ প্লেটের উপর শুধু এদের সম্ভাব্য আপতনবিন্দুগুলি তরঙ্গ-বলবিজ্ঞানের দ্বারা গণনা ক'রে বলা চলে। এই সম্ভাব্য অবস্থানের প্রকৃতি একটি গাণিতিক অপেক্ষকের সাহায্যে প্রকাশ করা যায়। কিন্তু দেখা যায় যে এই সম্ভাব্য *অবস্থানের প্রকৃতি ঠিক হুবহু কোন তরঙ্গের দ্বারা স্ফটিকের ভিতর সৃষ্ট ব্যতিচার* আকৃতির মতো।

একইভাবে, একটি ফাঁকের মধ্য দিয়ে যখন আলোককণার প্রবাহ নির্গত হয়ে আসে সেই মুহূর্ত্তে আমরা এদের স্থানাঙ্ক অনেকটা নির্দ্দিষ্টভাবে জানি, ফাঁকটি যত সঙ্কীর্ণ হবে এদের স্থানাঙ্ক তত শুদ্ধভাবে আমাদের জানা থাকবে।

কিন্তু তারপর ঐ প্রবাহ দিয়ে যখন দূরে একটি পর্দার উপর পড়ে তখন সেই আলোককণাগুলির স্থানাঙ্ক আমরা আর তত শুদ্ধভাবে জানি না, কারণ তরঙ্গ-বলবিজ্ঞানের ভিত্তিতে আমরা শুধু ঐ পর্দার উপর আলোককণাগুলির সম্ভাব্য আপতন বিন্দুই গণনা ক'রে বলতে পারি। তবে গণনার দ্বারা দেখান যায় যে, সম্ভাব্য আপতন বিন্দুগুলির অবস্থিতি ঠিক ঐ ফাঁকের ভিতর দিয়ে প্রবাহিত তরঙ্গের দ্বারা সৃষ্ট ব্যতিচার আকৃতির মতোই।

আগেই আমরা বলেছি যে, ডিব্রগলির পদার্থতরঙ্গের প্রকল্প প্রকাশিত হবার পর শ্রডিঙ্গার (Schröedinger) ঐ তরঙ্গগুলি যে বিশেষ সমীকরণ মেনে চলে তা আবিষ্কার করেন। এই সমীকরণ অনুযায়ী কণাগুলির প্রকৃতি একটি তরঙ্গধর্ম্মী অপেক্ষকের দ্বারা প্রকাশিত। এই অপেক্ষক সময় ও স্থানাঙ্কের অপেক্ষক, একে বলা হয় তরঙ্গ-অপেক্ষক। এই তরঙ্গধর্ম্মী অপেক্ষকের দ্বারা নির্দেশিত হবার ফলে কণাগুলির ব্যবহারও হয় তরঙ্গধর্ম্মী, কিন্তু তরঙ্গ-অপেক্ষকের বর্গ হ'ল নির্দ্দিষ্ট স্থানাঙ্কে কণাটির উপস্থিতির সম্ভাব্যতা। এই ধরণের সম্ভাব্যতার প্রস্তাবনার সাহায্যে এবং তরঙ্গ-অপেক্ষকের ধর্ম ব্যবহার ক'রে কণাদের তরঙ্গ ও কণাধর্ম্মের সমন্বয় সাধন করা যায়, আলোর প্রকৃতিও অনুরূপ উপায়ে বর্ণনা করা যায়। শ্রডিঙ্গারের সাথে সাথে বিজ্ঞানী হাইসেনবার্গও (Heisenberg) এক ধরণের কোয়াণ্টাম বলবিজ্ঞানের সূচনা করেন এবং পরে প্রমাণিত হয়েছে যে এই দুই ধরণের কোয়াণ্টাম বলবিজ্ঞান আসলে একই তত্ত্বের দুই বিভিন্ন প্রকারের গাণিতিক উপস্থাপন মাত্র। শ্রডিঙ্গারের কোয়াণ্টাম সমীকরণ কিন্তু আপেক্ষিকতাতত্ত্ব-সম্মত নয়, অর্থাৎ দুই পৃথক কাঠামোতে অবস্থিত দুই দর্শক যারা পরস্পরের সঙ্গে নির্দ্দিষ্ট আপেক্ষিক গতিতে চলছে, এদের কাছে শ্রডিঙ্গারের সমীকরণ অভিন্ন মনে হবে না। এই ত্রুটি সংশোধন ক'রে পরে বিজ্ঞানী ডির‍্যাক (Dirac) একটি আপেক্ষিকতা-তত্ত্ব-সম্মত কোয়াণ্টাম তত্ত্বের সমীকরণ আবিষ্কার করেন, এভাবে তিনি ইলেকট্রনের জন্য যে সমীকরণটি তৈরী করেন তা এখন ডির‍্যাক সমীকরণ নামে সুপ্রসিদ্ধ। কোয়াণ্টাম বলবিজ্ঞানই হ'ল অণু ও পরমাণু জগতের সঠিক বলবিজ্ঞান। পরমাণুর অন্তর্নিহিত গঠন-বিশ্লেষণের ক্ষেত্রে সঠিক ফল পেতে হলে এই বলবিজ্ঞানের ব্যবহার অপরিহার্য্য।

পরীক্ষার দ্বারাও কোয়াণ্টাম বলবিজ্ঞানের পরিসংখ্যানভিত্তিক তাৎপর্য্যের যথার্থতা প্রমাণিত হয়েছে। উদাহরণ হিসাবে বলা যেতে পারে একটি ফাঁকের ভিতর থেকে নির্গত আলোর ব্যতিচার আকৃতির কথা, যদি খালি

চোখে অথবা ক্যামেরায় ছবি তুলে দেখা যায়, তবে আলোর তীব্রতার হ্রাস-বৃদ্ধির একটা নির্দিষ্ট ধরণ লক্ষ্য করা যাবে কিন্তু ঐ ব্যতিচার আকৃতি যদি গাইগার মূলার গণনকার বা ঐ জাতীয় কোন যন্ত্রের সাহায্যে পরীক্ষা করা যায় যেগুলি প্রতিটি আলোককণা পৃথকভাবে গণনা করতে সক্ষম, তবে দেখা যাবে যে ঐ ব্যতিচার আকৃতির বাস্তবতা শুধু পরিসংখ্যানগতভাবেই সত্য।

পদার্থ ও আলোর এই ধরণের যুগপৎ কণা ও তরঙ্গধর্ম্ম থাকার ফলে কতগুলি অত্যন্ত জটিল বৈজ্ঞানিক সমস্যার উদ্ভব হয়। আমরা আগেই দেখেছি যে, সম্ভাব্যতার প্রস্তাব অনুযায়ী যদি নির্দিষ্ট কোন সময়ে একটি গতিশীল কণার অবস্থিতি নির্ভুলভাবে জানা থাকে তবে কিছু দূরত্বে কণাটির অবস্থিতি হয়ে পড়ে সম্ভাব্য, অর্থাৎ কণার প্রাথমিক অবস্থান নির্ভুলভাবে জানা থাকলেও পরবর্ত্তী অবস্থান আর তত নির্ভুলভাবে জ্ঞাত থাকে না, শুধু পরবর্ত্তী সম্ভাব্য অবস্থিতির বিষয়েই গণনা ক'রে বলা যায়। এর ফলে পরমাণু জগতে সঠিক পরিমাপের ক্ষেত্রে খানিকটা অনিশ্চয়তার সৃষ্টি হয়। হাইসেনবার্গ কোয়াণ্টাম বলবিজ্ঞান ব্যবহার ক'রে দেখিয়েছেন যে এই অনিশ্চয়তা আরও ব্যাপক, কণাজগতে যেকোন সময় এবং পরিবেশে যেকোন পরীক্ষার ক্ষেত্রেই, যুগপৎ স্থানাঙ্ক ও ভরবেগ কিংবা সময় ও শক্তির পরিমাপে কতগুলি অনিশ্চয়তা আছে। একে বলা হয় হাইসেনবার্গ অনিশ্চয়তা নীতি এবং এই নীতি পদার্থবিজ্ঞানে এক মৌলিক তাত্ত্বিক সমস্যার সৃষ্টি করেছে। ধরা যাক, কোন একটি পরীক্ষায় একই সঙ্গে একটি কণার x-স্থানাঙ্ক ও x-অক্ষ বরাবর এর ভরবেগ পরিমাপ করা হচ্ছে, এইক্ষেত্রে হাইসেনবার্গ অনিশ্চয়তা নীতিটি নিম্নলিখিত গাণিতিক উপায়ে উপস্থাপিত করা যায়

$$\Delta x . \Delta p_x \geq h \qquad \cdots \quad 3{\cdot}18$$

এখানে Δx হ'ল এই পরিমাপে x-স্থানাঙ্কের মোট অনিশ্চয়তার পরিমাণ এবং Δp_x, ভরবেগের x-অংশের মোট অনিশ্চয়তার পরিমাণ। হাইসেনবার্গ অনিশ্চয়তা নীতি অনুযায়ী Δx ও Δp_x-এর গুণফল সবসময়ই h অপেক্ষা বড় অথবা h-এর সমান। Δx ও Δp_x-এর পরিমাণ পরস্পরের ব্যস্ত-অনুপাতী এবং যেহেতু h একটি সসীম ধ্রুবরাশি, স্পষ্টতঃই কোন পরীক্ষাতেই একই সঙ্গে x এবং p_x সম্পূর্ণ নির্ভুলভাবে মাপা সম্ভব নয়। যদি একটি কণার x-স্থানাঙ্ক অত্যন্ত নির্ভুলভাবে পরিমাপ করা হয় (অর্থাৎ Δx-এর পরিমাণ খুব কম) তাহলে p_x-এর অনিশ্চয়তা Δp_x সেই অনুপাতে বৃদ্ধি পাবে যাতে 3·18 সর্ত্তটি সবসময়ই ঠিকভাবে পালিত হয়। ঠিক একইভাবে, y এবং z

স্থানাঙ্কের পরিমাপের অনিশ্চয়তা Δy এবং Δz-এর সঙ্গে ঐসব দিকে ভরবেগের অনিশ্চয়তা Δp_y এবং Δp_z-এর একই রকম সম্বন্ধ রয়েছে

$$\Delta y . \Delta p_y \geq h$$
$$\Delta z . \Delta p_z \geq h \quad \cdots \quad \cdots \quad 3.19$$

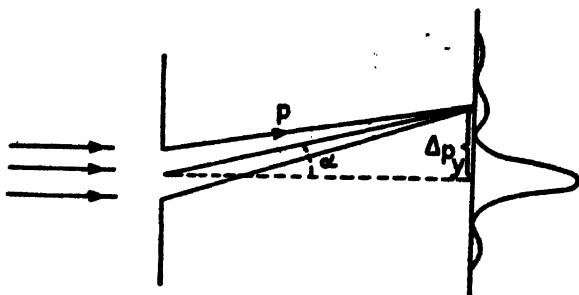
ঠিক একই রকম অনিশ্চয়তার সৃষ্টি হয় সময় ও শক্তির যুগপৎ পরিমাপের ক্ষেত্রে, সেক্ষেত্রে অনিশ্চয়তার নীতিটি হ'ল

$$\Delta t . \Delta E \geq h \quad \cdots \quad 3.20$$

অর্থাৎ কোন কণার শক্তি যদি সম্পূর্ণ নির্ভুলভাবে পরিমাপ করতে হয় তবে একে অসীম সময় ধ'রে লক্ষ্য করতে হবে। সময় ও শক্তির পরিমাপের এই পারস্পরিক অনিশ্চয়তার একটি সুন্দর নিদর্শন হ'ল সাধারণ আলোক বর্ণালীর রেখাসমূহ ও পরমাণু-কেন্দ্রীনজাত গামারশ্মির মধ্যে শক্তির অনিশ্চয়তার পার্থক্য। সাধারণ বর্ণালী সৃষ্টি হয় পরমাণুর বহিঃস্থ ইলেকট্রনের উত্তেজনার ফলে; গামারশ্মি উৎপন্ন হয় সরাসরি পরমাণু-কেন্দ্রীন থেকে, এদের উৎপাদন ও ধর্মাবলী পরে বিস্তৃতভাবে আলোচিত হবে। পরমাণুতে ইলেকট্রনের উত্তেজনাকাল সাধারণতঃ হয় এক সেকেণ্ডের সামান্য ভগ্নাংশমাত্র, কিন্তু কেন্দ্রীনের শক্তিস্তরের উত্তেজন যার ফলে গামারশ্মি উৎপন্ন হয়, এদের উত্তেজনাকালের স্থায়িত্ব অনেক সময় যথেষ্ট দীর্ঘ হতে পারে, এমনকি কয়েক দিন পর্য্যন্ত হতে পারে, অর্থাৎ এক্ষেত্রে Δt-এর পরিমাণ অত্যধিক সুতরাং ΔE খুব কম হবে আশা করা যায়। পরীক্ষার ফলে দেখা যায় যে, ঐসব কেন্দ্রীনজাত গামারশ্মি আলোক বর্ণালীর রেখাসমূহের তুলনায় অনেক বেশী তীক্ষ্ণ, অর্থাৎ এদের ভিতর শক্তির অনিশ্চয়তার পরিমাণ অনেক কম। এই অনিশ্চয়তা যাবতীয় পদার্থকণার ক্ষেত্রেও প্রযোজ্য।

পরিমাপের ক্ষেত্রে কিভাবে এই অনিশ্চয়তা নীতি কার্য্যকরী হয় তা এক সহজ পরীক্ষার আয়োজনের বিশ্লেষণ দ্বারা বোঝান যেতে পারে। একটি সঙ্কীর্ণ ফাঁকের ভিতর দিয়ে ইলেকট্রন তরঙ্গের ব্যতিচারের কথা ধরা যাক, 3.13 চিত্রে এই ব্যতিচার আকৃতি দেখান হয়েছে। এখানে ফাঁকটির প্রসার Δy হ'ল প্রবাহিত ইলেকট্রনগুলির y-স্থানাঙ্কের মোট অনিশ্চয়তা, Δy-এর পরিমাণ যত কম হবে ইলেকট্রনের y-স্থানাঙ্কের পরিমাণ তত শুদ্ধভাবে জানা যাবে। কিন্তু ব্যতিচারের ধর্ম্ম অনুযায়ী ফাঁকের প্রসার যত কম হবে ততই ব্যতিচার আকৃতিটি পর্দ্দার উপর y-দিক বরাবর ছড়িয়ে পড়তে থাকবে। এই ছড়িয়ে পড়ার অর্থ হচ্ছে যে, যেসব আলোককণাগুলি ব্যতিচার আকৃতির জন্ম দিয়েছে, Δy-এর পরিমাণ কমানর ফলে $\pm$ y-দিকে

তাদের ভরবেগের পরিমাণ বৃদ্ধি পেয়েছে। ধরা যাক, ব্যতিচার ঘটার ফলে ইলেকট্রনগুলি y-দিকে Δp_y ভরবেগ অর্জ্জন করেছে, α যদি এদের বিক্ষেপণ কোণ এবং p প্রাথমিক ভরবেগ হয় তাহলে আমরা লিখতে পারি

$$\Delta p_y = p \sin \alpha \qquad \cdots \quad 3{\cdot}21$$

চিত্র 3·13

যেহেতু একটি ইলেকট্রন সমগ্র ব্যতিচার আকৃতির মধ্যে যেকোন একটি বিন্দুতে উপস্থিত থাকতে পারে, Δp_y হ'ল প্রাথমিক গতিপথের সঙ্গে লম্বভাবে এর ভরবেগের যে অনিশ্চয়তা সৃষ্টি হয় তার পরিমাণ। ব্যতিচার তত্ত্বে কেন্দ্রীয় চরম তীব্রতা অঞ্চলের কৌণিক বিস্তৃতি এবং ফাঁকের প্রসারের মধ্যে যে নির্দিষ্ট সম্বন্ধ আছে তার সম্বন্ধে আমরা পূর্ব্বে উল্লেখ করেছি (3·5 সমীকরণ)। কেন্দ্রীয় চরম তীব্রতা অঞ্চল ছাড়াও পাশাপাশি আরও অন্যান্য তীব্রতা অঞ্চলের অস্তিত্ব থাকবে এবং ফাঁকের প্রসার খুব কম হলে এরকম বহুসংখ্যক পাশাপাশি অবস্থিত চরম তীব্রতা অঞ্চলের অস্তিত্ব দেখা যায়, তবে ইলেকট্রনটির কেন্দ্রীয় তীব্রতা অঞ্চলের ভিতর উপস্থিত থাকার সম্ভাবনাই সর্ব্বাধিক। সুতরাং বিক্ষেপণ কোণ α-র জন্য বর্ত্তমান ক্ষেত্রে আমরা নিম্নলিখিত সর্ত্তটি লিখতে পারি

$$\Delta y \sin \alpha \geq \lambda \qquad \cdots \quad 3{\cdot}22$$

ইলেকট্রন পদার্থতরঙ্গের ক্ষেত্রে ভরবেগ ও তরঙ্গদৈর্ঘ্যের মধ্যে ডিব্রগলি সম্বন্ধ $p = \frac{h}{\lambda}$ ব্যবহার ক'রে 3·21 ও 3·22 সূত্রদ্বয় থেকে α অপসারিত করলে আমরা পাই

$$\Delta y \sin \alpha = \Delta y \cdot \frac{\Delta p_y}{p} = \Delta y \cdot \Delta p_y \cdot \frac{\lambda}{h} \geq \lambda$$

অর্থাৎ $\qquad \Delta y . \Delta p_y \geq h$

সুতরাং এই বিশেষ উদাহরণে 3·18 সম্বন্ধটি যথার্থ ব'লে প্রতিপন্ন হয়।

অপর একটি পরীক্ষার ধরা যাক আমরা ইলেকট্রনকে একটি অণুবীক্ষণের ভিতর দিয়ে লক্ষ্য ক'রে এর স্থানাঙ্ক পরিমাপ করার চেষ্টা করছি। অণুবীক্ষণে দেখার অর্থ হ'ল ইলেকট্রনের উপর থেকে প্রতিফলিত আলোতে এর প্রতিবিম্ব লক্ষ্য করা, এবং যেহেতু ইলেকট্রন খুবই ক্ষুদ্র পদার্থ, একে দেখতে হ'লে অত্যন্ত স্বল্প তরঙ্গদৈর্ঘ্য-সমন্বিত আলো ব্যবহার করা প্রয়োজন। আবার তরঙ্গদৈর্ঘ্য যত ছোট হবে আলোককণার ভরবেগ হবে তত বেশী (3.13 সূত্র) এবং আলোককণাটি ইলেকট্রনের উপর আপতিত হলে তার মাঝেও কিছু ভরবেগ সঞ্চারিত করবে, এটিই হল কম্পটন প্রক্রিয়া। দেখা যায় যে যখনই প্রতিফলিত আলোতে এভাবে ইলেকট্রনের স্থানাঙ্ক শুদ্ধভাবে মাপার চেষ্টা করা হয় তখনই এর ভরবেগ পরিবর্তিত হয়ে যায়, এর ভরবেগের অনিশ্চয়তা বৃদ্ধি পায়। এই ধরণের যুক্তি প্রয়োগ ক'রে সবসময়ই দেখা যায় যে আমরা যেকোন পরীক্ষাই কল্পনা করি না কেন, প্রত্যেকক্ষেত্রেই যুগপৎ স্থানাঙ্ক ও ভরবেগ নির্দ্ধারণ করতে গেলে পরিমাপের নির্ভুলতা 3.18 ও 3.19 সূত্রসমূহের দ্বারা সীমিত থাকবে।

অনিশ্চয়তা নীতি আধুনিক বিজ্ঞানে এক গভীর সমস্যার সৃষ্টি করেছে। আমরা যদি কোন কণার ভবিষ্যৎ গতির প্রকৃতি সম্পূর্ণ নির্ভুলভাবে জানতে চাই তবে এর প্রাথমিক স্থানাঙ্ক ও ভরবেগ দুইই সম্পূর্ণ নির্ভুলভাবে জানা থাকা দরকার যা হাইসেনবার্গের অনিশ্চয়তা নীতি অনুসারে অসম্ভব। এথেকে প্রমাণ হয় যে পদার্থকণার স্বরূপ ও গতিপ্রকৃতি কখনই সম্পূর্ণ নির্ভুলভাবে জানা সম্ভব নয়। আলোচনা থেকে বোঝা যায় যে, এই অনিশ্চয়তা সূক্ষ্ম পরিমাপ যন্ত্রের অভাবে অথবা আমাদের পরীক্ষাপদ্ধতির দুর্ব্বলতার জন্য সৃষ্টি হয় না। এটা পদার্থ ও বিকিরণের নিজস্ব ধর্ম এবং পরিমাপের সূক্ষ্মতার উপর নির্ভর করে না। এই অনিশ্চয়তা সম্পূর্ণ কোয়াণ্টাম বলবিজ্ঞানের অবদান, সনাতন বলবিজ্ঞানে এই ধরণের অনিশ্চয়তার কোন অস্তিত্ব নেই।

কণাপ্রসঙ্গ

এই অধ্যায়টি শেষ করার আগে আমরা বিভিন্ন কণার অন্যান্য কতগুলি কোয়াণ্টাম ধর্ম্ম সম্বন্ধে সংক্ষিপ্ত আলোচনা করব। কণাদের ঐসব ধর্ম্মাবলীর জ্ঞান এদের প্রকৃতি এবং এদের দ্বারা সৃষ্ট বিভিন্ন বলক্রিয়া সম্বন্ধে অবহিত হবার জন্য অপরিহার্য্য, পরবর্ত্তী অধ্যায়গুলিতে প্রায়শঃই এদের ব্যবহার দেখতে পাওয়া যাবে। এইসঙ্গে কয়েকটি নূতন নূতন কণার পরিচিতি দেওয়া হবে, তবে এদের আবিষ্কার কাহিনী এবং ধর্ম্মাবলী অনুশীলনের পদ্ধতি সম্বন্ধে পরবর্ত্তী অধ্যায়গুলিতে ক্রমশঃ বিস্তৃতভাবে আলোচনা করা হবে।

ঘূর্ণি ও চৌম্বক ভ্রামক (Spin and Magnetic moment)

আধুনিক পরীক্ষায় নিঃসন্দেহে প্রমাণিত হয়েছে যে ইলেকট্রন এবং প্রোটন উভয়েরই একপ্রকার কৌণিক ভরবেগ রয়েছে, অর্থাৎ এই কণাগুলির ব্যবহার এরকম যেন এদের ভিতর একটি নির্দিষ্ট দৃঢ়সংবদ্ধ অক্ষ আছে যার চারপাশে কণাটির ভর সব সময় আবর্তিত হয়ে চলেছে। পরমাণুর ভিতর কণাগুলির দুই রকমের কৌণিক ভরবেগ দৃষ্ট হয়। যদি বহিঃস্থ কোন স্থির বিন্দুর বা অক্ষের চতুষ্পার্শ্বে কণাটি আবর্তিত হতে থাকে তবে ঐ ধরণের কৌণিক ভরবেগকে বলা হয় কক্ষীয় কৌণিক ভরবেগ। আর যদি নিজ দেহস্থিত কোন অক্ষের চতুষ্পার্শ্বে কণাটির ভর আবর্তিত হতে থাকে তবে ঐ ধরণের কৌণিক ভরবেগকে বলা হয় ঘূর্ণি (spin)। কোয়াণ্টাম বলবিজ্ঞানে কণাদের ঘূর্ণি ও কৌণিক ভরবেগ পরিমাপের একটি স্বাভাবিক একক আছে, এগুলি প্ল্যাংকের ধ্রুবক h-এর এককে মাপা হয়। প্রসঙ্গতঃ উল্লেখযোগ্য যে প্ল্যাংকের ধ্রুবক এবং কৌণিক ভরবেগের মাত্রা (dimension) একই, সময় × শক্তি, সুতরাং কৌণিক ভরবেগের একক হিসাবে প্ল্যাংকের ধ্রুবকের ব্যবহার সঙ্গত এবং পরমাণু জগতে যাবতীয় কৌণিক ভরবেগই এই এককে প্রকাশিত হয়। এই ধ্রুবকের এককে ইলেকট্রনের ঘূর্ণির পরিমাণ হ'ল

$$S = \frac{1}{2}\,\frac{h}{2\pi} = \tfrac{1}{2}\hbar \qquad \cdots \quad 3{\cdot}23$$

$\hbar$ একটি নূতন ধ্রুবক, পরমাণুবিজ্ঞানের গণনায় বহুক্ষেত্রেই h এর বদলে $\hbar$ এককটির ব্যবহার সুবিধাজনক। প্রোটনের ঘূর্ণির পরিমাণও $\frac{1}{2}\hbar$। আলোক-কণার ঘূর্ণি $1\hbar$, বিভিন্ন পরীক্ষায় এর অস্তিত্ব প্রকটিত হয়। কোয়াণ্টাম বলবিজ্ঞানে ঘূর্ণি বা কৌণিক ভরবেগ ভেক্টরের সংজ্ঞা একটু স্বতন্ত্র, এই সম্বন্ধে পঞ্চম অধ্যায়ে বিশদভাবে আলোচনা করা হবে। উপরোক্ত 3·23 সংজ্ঞাটি কোনও একটি নির্দিষ্ট দিকে ইলেকট্রন ঘূর্ণির চরম অভিক্ষেপের পরিমাণকে নির্দেশ করে। পরমাণু জগতে যাবতীয় কৌণিক ভরবেগের পরিমাণ সবসময়েই $\hbar$-এর অখণ্ড অথবা অর্দ্ধ অখণ্ড সংখ্যক গুণিতক হয়ে থাকে।

পরমাণু-কেন্দ্রীনের ভিতর নিউট্রন নামে একটি কণার অস্তিত্ব আছে। এর ভর প্রোটনের ভরের সামান্য একটু বেশী। পরমাণু-কেন্দ্রীন নিউট্রন ও প্রোটনের সমন্বয়ে গঠিত। তবে মুক্ত অবস্থায় নিউট্রন বেশীক্ষণ স্থায়ী থাকতে পারে না, কিছু সময় পরেই এর ভিতর থেকে একটি ইলেকট্রন নির্গত হওয়ায় এটি একটি প্রোটনে রূপান্তরিত হয়, এই প্রক্রিয়াকে বলা হয় নিউট্রনের ক্ষরণ।

নিউট্রনের ঘূর্ণি ঠিক প্রোটন অথবা ইলেকট্রনের ঘূর্ণির সমান, অর্থাৎ $\frac{1}{2}\hbar$। একটি প্রোটন ও একটি নিউট্রন মিলে ডয়টেরন বা ভারী হাইড্রোজেনের আয়ন সৃষ্টি করে, ডয়টেরনের ঘূর্ণির পরিমাণ $1\hbar$। আমরা জানি যে, ঘূর্ণনশীল আধান চৌম্বক ভ্রামক সৃষ্টি করে, সুতরাং ইলেকট্রন ও প্রোটনের ভিতর ঘূর্ণনশীল আধানের অস্তিত্ব থাকায় এদের নির্দিষ্ট চৌম্বক ভ্রামক থাকবে আশা করা যায়। কোয়াণ্টাম বলবিজ্ঞানের ডির‍্যাক সমীকরণ যার সাহায্যে ইলেকট্রনের প্রকৃতি অত্যন্ত নির্ভুলভাবে গণনা করা যায়, এর সাহায্যে ইলেকট্রনের ঘূর্ণি ও চৌম্বক ভ্রামকের অস্তিত্ব প্রদর্শন করা যায়। এই সমীকরণের গণনা অনুসারে ইলেকট্রনের ঘূর্ণির পরিমাণ $\frac{1}{2}\hbar$ এবং এর চৌম্বক ভ্রামকের পরিমাণ

$$\mu_e = -\frac{eh}{4\pi m_e c} = -\frac{e\hbar}{2m_e c} \text{ আর্গ/গস} \qquad \cdots \quad 3{\cdot}24$$

এই পরিমাণ পরীক্ষালব্ধ ফলাফলের সঙ্গে অভিন্ন, এক্ষেত্রে m_e হ'ল ইলেকট্রনের স্থির ভর। যদি এই একই সূত্রের দ্বারা প্রোটনের চৌম্বক ভ্রামক নিরূপিত হয় তবে শুধু ইলেকট্রনের ভর m_e-কে প্রোটনের ভর M_p দ্বারা পরিবর্তিত করতে হবে, সুতরাং সেক্ষেত্রে প্রোটন ও ইলেকট্রনের চৌম্বক ভ্রামকের অনুপাত হবে তাদের পরস্পরের ভরের ব্যস্ত অনুপাতী, অর্থাৎ প্রোটনের চৌম্বক ভ্রামকের পরিমাণ ইলেকট্রনের তুলনায় প্রায় 1836 গুণ কম হবে। কিন্তু পরীক্ষার ফলে প্রমাণিত হয়েছে যে প্রোটনের চৌম্বক ভ্রামক ডির‍্যাক সমীকরণ অনুযায়ী যা হওয়া উচিত ছিল তার চেয়ে 2·79 গুণ বেশী, অর্থাৎ

$$\mu_p = 2{\cdot}79 \cdot \frac{e\hbar}{2M_p c} \text{ আর্গ/গস} \qquad \cdots \quad 3{\cdot}25$$

নিউট্রনের কোন আধান নেই সুতরাং এর ঘূর্ণি থাকা সত্ত্বেও মনে হতে পারে যে এর কোন চৌম্বক ভ্রামক নেই, কিন্তু পরীক্ষায় প্রমাণিত হয় যে নিউট্রনেরও চৌম্বক ভ্রামক রয়েছে এবং এর পরিমাণ

$$\mu_n = -1{\cdot}91 \frac{e\hbar}{2M_p c} \text{ আর্গ/গস}$$

লক্ষণীয় যে নিউট্রনের চৌম্বক ভ্রামক ঋণ-চিহ্নবিশিষ্ট, যদি একটি নিউট্রন ও একটি প্রোটন একই দিকে আবর্তিত হতে থাকে অর্থাৎ এদের ঘূর্ণি ভেক্টরদ্বয় যদি একই দিকে থাকে, তবে প্রোটনের চৌম্বক ভ্রামক ভেক্টর যে দিক অভিমুখে থাকবে, নিউট্রনের চৌম্বক ভ্রামক থাকবে তার বিপরীত দিকে। ডির‍্যাক সমীকরণ থেকে ইলেকট্রনের চৌম্বক ভ্রামকের যে পরিমাণ পাওয়া যায়, তা পরীক্ষালব্ধ পরিমাণের সঙ্গে সম্পূর্ণ অভিন্ন, কিন্তু নিউট্রন ও প্রোটনের চৌম্বক

প্রাবল্যের ক্ষেত্রে এখনও এমন কোন অবিসংবাদিত তত্ত্ব নেই যার সাহায্যে এদের পরিমাণ সম্পূর্ণ নির্ভুলভাবে গণনা করা যেতে পারে।

প্রতীপ কণা (Antiparticle)

ঠিক ইলেকট্রনের সমান ভর অথচ এর বিপরীত আধানবিশিষ্ট এক ধরণের কণা আবিষ্কৃত হয়েছে যাদের বলা হয় পজিট্রন ; পরিমাণে ইলেকট্রন ও পজিট্রনের আধান পরস্পর একেবারে সমান, কিন্তু এরা বিপরীত চিহ্ন-বিশিষ্ট, পজিট্রন একটি ধন-আধানযুক্ত কণা। এই কারণে এদের যথাক্রমে e^- ও e^+ চিহ্নের দ্বারা নির্দেশ করা হয়। পজিট্রনকে বলা হয় ইলেকট্রনের প্রতীপ কণা। তেমনি প্রোটনেরও প্রতীপ কণা রয়েছে, একে বলা হয় প্রতীপ প্রোটন। এর ভর প্রোটনের ভরের সমান, আধানের পরিমাণ ও পরস্পর সমান কিন্তু বিপরীত চিহ্নবিশিষ্ট, অর্থাৎ প্রতীপ প্রোটন ঋণ-আহিত। ইলেকট্রন ও পজিট্রনের ধর্ম্ম হ'ল যে এরা পরস্পরের সংস্পর্শে আসলে একে অন্যকে ধ্বংস ক'রে ফ্যালে

$$e^+ + e^- = h\nu_1 + h\nu_2$$

এবং এর ফলে দুটি আলোককণা সৃষ্টি হয়। এই প্রক্রিয়াকে বলা হয় জোড়া বিনাশ প্রক্রিয়া। এই বিক্রিয়া দ্রুত ঘটার সম্ভাবনা থাকার জন্য, যদিও পরীক্ষাগারে নানাভাবে পজিট্রন উৎপাদন করা সম্ভব, একে বেশীক্ষণ বাঁচিয়ে রাখা যায় না, অতি অল্প সময়ের মধ্যেই কোন একটি ইলেকট্রনের সঙ্গে মিলিত হয়ে এটি ধ্বংস হয়ে যায়। এর বিপরীত প্রক্রিয়াকে বলা হয় জোড়া সৃষ্টি প্রক্রিয়া। একটি যথোপযুক্ত শক্তিবিশিষ্ট আলোককণা কোন পরমাণু-কেন্দ্রীনের সামনে এক ইলেকট্রন পজিট্রন জোড়া সৃষ্টি করতে পারে

$$h\nu \rightarrow e^+ + e^-$$

স্বভাবতঃই, ভরবেগ ও শক্তি সংরক্ষণনীতি বজায় রাখতে হলে জোড়া সৃষ্টি সম্ভব হবার জন্য আলোককণাটির শক্তির পরিমাণ ইলেকট্রন ও পজিট্রনের মিলিত স্থির শক্তির পরিমাণ $2m_ec^2$ (1·02 এমইভি)-এর চেয়ে বেশী হওয়া প্রয়োজন। এই প্রক্রিয়ায় আলোককণাটি সম্পূর্ণ ধ্বংস হয়ে গিয়ে এর সমস্ত শক্তি ইলেকট্রন ও পজিট্রনের ভর ও গতিশক্তিতে রূপান্তরিত হয়। এই প্রক্রিয়া শুধু কোন পরমাণু-কেন্দ্রীনের নিকটে ঘটতে পারে, কেন্দ্রীনের তীব্র বৈদ্যুতিক ক্ষেত্র এই প্রক্রিয়ার একরকম অনুঘটকের কাজ করে। একটি ধন-আহিত কেন্দ্রীনের খুব নিকটে ঘটে ব'লে জোড়া সৃষ্টি প্রক্রিয়ায় নির্গত পজিট্রনের শক্তি ইলেকট্রনের শক্তির তুলনায় সাধারণতঃ একটু বেশী থাকে। একটি যথোপযুক্ত শক্তিশালী

আলোককণার জোড়া সৃষ্টি প্রক্রিয়ার দ্বারা শোষণের সম্ভাবনা শোষণশীল পদার্থের পারমাণবিক সংখ্যার বর্গের অর্থাৎ Z^2-এর সমানুপাতী এবং আলোককণার শক্তির সঙ্গে সঙ্গেও এই প্রক্রিয়া ঘটার সম্ভাব্যতা দ্রুত বৃদ্ধি পেতে থাকে।

প্রোটন এবং প্রতীপ প্রোটনও পরস্পরের সংস্পর্শে এলে নিজেদের ধ্বংস করে ফ্যালে এবং তার ফলে নানারকম নূতন নূতন কণার সৃষ্টি হয়। জগতে আমরা স্থায়ী অবস্থায় প্রতীপ কণা দেখতে পাই না তার কারণ কণা এবং প্রতীপ কণার একত্র সহাবস্থান অসম্ভব, কিন্তু বিজ্ঞানীরা কল্পনা করেছেন যে, মহাবিশ্বে এমন ছায়াপথ থাকা সম্ভব যেখানে সমস্ত পদার্থই প্রতীপ কণার গঠিত। প্রোটন ও প্রতীপ প্রোটন জোড়া বিনাশ প্রক্রিয়ায় মোট নিঃসারিত শক্তির পরিমাণ এদের মোট আপেক্ষিকতাভিত্তিক শক্তির যোগফলের সমান অর্থাৎ অন্ততঃ 1862 এমইভি। এই শক্তির পরিমাণ অতিশয় বৃহৎ এবং আমাদের জ্ঞাত অন্য কোন প্রকার বিক্রিয়ায় এত শক্তি নিঃসারিত হয় না। পরবর্ত্তী অধ্যায়গুলিতে আমরা বিভিন্নরকম কেন্দ্রীনঘটিত বিক্রিয়ার বিষয় আলোচনা করব কিন্তু সেসব ক্ষেত্রেও যে শক্তি নিঃসারিত হয় তা এই শক্তির অতিক্ষুদ্র ভগ্নাংশ মাত্র।

নিউট্রনেরও প্রতীপ কণা আবিষ্কৃত হয়েছে, স্বাভাবিক নিউট্রনের সঙ্গে এর পার্থক্য হ'ল এই যে, এর চৌম্বক ভ্রামক ধন-চিহ্নবিশিষ্ট যদিও পরিমাণে নিউট্রনের চৌম্বক ভ্রামকের সমান, আধান উভয়েরই শূন্য এবং ভরও পরস্পর অভিন্ন। প্রতীপ নিউট্রনের ক্ষরণের ফলে একটি প্রতীপ প্রোটন ও একটি পজিট্রন উৎপন্ন হয়। সর্ব্বশেষ অধ্যায়টিতে আমরা প্রতীপ কণাদের সম্বন্ধে আরও বিশদভাবে আলোচনা করব।

ভরবিহীন কণা (Massless particle)

আলোককণাকে একটি ভরবিহীন কণা হিসাবে কল্পনা করা যায়, এর স্থির ভরের পরিমাণ শূন্য কিন্তু ভরবেগ নির্দ্দিষ্ট। আপেক্ষিকতাতত্ত্বে যেসব কণার স্থিরভর শূন্য তাদের গতিবেগ সবসময়ই আলোর গতিবেগের সমান। এই সিদ্ধান্তটি নিম্নলিখিত উপায়ে প্রমাণ করা যায়। আপেক্ষিকতাতত্ত্ব অনুযায়ী একটি কণার মোট শক্তি 2·39 সূত্রের দ্বারা প্রকাশিত

$$E=\sqrt{m_0^2c^4+p^2c^2}=\frac{m_0c^2}{\sqrt{1-v^2/c^2}}$$

সুতরাং ভরবিহীন কণার ক্ষেত্রে

$$E=pc$$

আবার আপেক্ষিকতাতত্ত্বে যেকোন কণার ক্ষেত্রেই

$$\frac{E}{p} = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1-v^2/c^2}} \Big/ \frac{m_0 v}{\sqrt{1-v^2/c^2}} = \frac{c^2}{v}$$

দেখা যায় যে, যখন $m_0 \to 0$ তখনও উপরোক্ত সর্তটি প্রতিপালিত হয়। সুতরাং ভরবিহীন কণার জন্য আমরা পাই

$$v = \frac{c^2 p}{E} = c$$

আরও একটি ভরবিহীন কণার অস্তিত্ব আছে, এর নাম নিউট্রিনো। কোন কোন প্রক্রিয়ায় এই কণাটি পরমাণু-কেন্দ্রীনের ভিতর থেকে নির্গত হয়, বিশেষ ক'রে নিউট্রনের ক্ষরণে একটি প্রোটন ও একটি ইলেকট্রনের সঙ্গে একটি নিউট্রিনোও উৎপন্ন হয়। নিউট্রিনোর শক্তিও আলোককণার মত সন্ততঃভাবে বিতরিত থাকতে পারে, এর স্থির ভর শূন্য সুতরাং গতিবেগ আলোর গতিবেগের সমান। এর কৌণিক ভরবেগ $\frac{1}{2}h$ এবং এই কণাটি তড়িৎচুম্বকীয় পরিক্রিয়ায় অংশগ্রহণ করে না। নিউট্রিনোর আবিষ্কার সম্বন্ধে পরে আলোচনা করা হবে।

ইলেকট্রনের আয়তন

ইলেকট্রনের আয়তন নির্ণয় করার মূল সমস্যা হ'ল এই যে, এর ভিতর বৈদ্যুতিক আধান কিভাবে বিতরিত থাকে তা আমাদের অজ্ঞাত। যদি ধরা যায় যে ইলেকট্রন একটি ক্ষুদ্র বর্তুলাকার পদার্থ এবং এর সমস্ত আধান ঐ বর্তুলের পরিধির উপর সমমাত্ররূপে ছড়ান আছে তাহলে ইলেকট্রনের স্থির বৈদ্যুতিক আত্মশক্তি গণনা করা যায়। এই গণনা নিম্নলিখিতভাবে করা সম্ভব। ধরা যাক বাইরে থেকে অল্প অল্প ক'রে আধান নিয়ে এসে ইলেকট্রনের আধান গড়ে তোলা হচ্ছে, কোন একসময়ে যখন ইলেকট্রনের আধান $-e'$ তখন যদি $-\Delta e'$ পরিমাণ আধান এর ভিতর যোগ করা হয়, তবে তার ফলে যে পরিমাণ বহিঃস্থ কাজ সম্পন্ন হবে তার পরিমাণ হ'ল

$$(-\Delta e')(-e'/r_0) = e'\Delta e'/r_0$$

এখানে r_0 ইলেকট্রনের ব্যাসার্দ্ধ। এইভাবে যোগ ক'রে গেলে শুরুতে $e'=0$ এবং সর্ব্বশেষে হয় $e'=e$, ইলেকট্রনের মোট আধান। সুতরাং এথেকে আমরা পাই

মোট সম্পন্ন বহিঃস্থ কার্য্যের পরিমাণ = ইলেকট্রনের স্থির বৈদ্যুতিক আত্মশক্তি $= \int_0^e \frac{e'de'}{r_0} = \frac{1}{2}e^2/r_0$

r_0 রাশিটির একটি পরিমাণ নির্ণয় করা যায় যদি ধরা যায় যে, এর ভর শুধু এই স্থির বৈদ্যুতিক আত্মশক্তির রূপান্তর মাত্র। আইনস্টাইনের ভর ও শক্তির অভিন্নতাসূচক সূত্রটি প্রয়োগ ক'রে এই পরিমাণ সঞ্চিত আত্মশক্তিকে নির্দিষ্ট পরিমাণ ভরের তুল্য হিসাবে লেখা যায়। ধরা যাক, এই ভরের পরিমাণ m_0; সুতরাং আমরা লিখতে পারি

$$m_0 c^2 = \tfrac{1}{2}\, e^2/r_0$$

$$r_0 = \frac{e^2}{2m_0 c^2}$$

যদি m_0-কে ইলেকট্রনের পরীক্ষালব্ধ ভরের সমান গণ্য করা হয় তবে তাথেকে আমরা ব্যাসার্দ্ধ r_0-এর পরিমাণ গণনা করতে পারি

$$r_0 = 1\Big/\left[\frac{2\times 9\times 10^{-28}\times(3\times 10^{10})^2}{(4{\cdot}8\times 10^{-10})^2}\right]$$

$$= 1{\cdot}42\times 10^{-13} \text{ সেণ্টিমিটার}$$

সুতরাং এভাবে ইলেকট্রনের ভর-এর স্থিরবৈদ্যুতিক আত্মশক্তির রূপান্তরমাত্র কল্পনা ক'রে নিলে এর ব্যাসার্দ্ধের একটা নির্দিষ্ট পরিমাণ গণনা করা যেতে পারে। লক্ষণীয় যে, যদি ইলেকট্রনকে একটি বিন্দু হিসাবে কল্পনা করা হয় অর্থাৎ যখন $r_0 = 0$, তখন এর স্থির বৈদ্যুতিক আত্মশক্তির পরিমাণ হবে অসীম। অবশ্য এই ধরণের গণনার উপর অতিরিক্ত তাৎপর্য্য আরোপণ করা অনুচিত কারণ আধুনিক তাত্ত্বিক আলোচনায় ইলেকট্রনকে একটি বিন্দুপ্রমাণ কণা হিসাবেই গণ্য করা হয়। এইসব তত্ত্বে প্রায়শঃই অসীম আত্মশক্তি একটি অবশ্যম্ভাবী সমস্যা হিসাবে উপস্থিত হয় এবং এই সমস্যাকে অতিক্রম করার জন্য তখন নানারকম অভিনব প্রকল্পের আশ্রয় নিতে হয়।

একই পদ্ধতি অনুসরণ ক'রে যদি প্রোটনের আত্মশক্তি এবং তাথেকে এর ব্যাসার্দ্ধ গণনা করা হয় তাহলে ব্যাসার্দ্ধের যে পরিমাণ পাওয়া যায় তা প্রায় 10^{-16} সেণ্টিমিটার। কিন্তু বিভিন্ন পরীক্ষায় প্রোটনের ব্যাসার্দ্ধ সম্বন্ধে অবহিত হওয়া যায়, বিশেষতঃ হাইড্রোজেন পরমাণুর উপর শক্তিশালী ইলেকট্রনের বিচ্ছুরণ ঘটিয়ে এবং বিচ্ছুরণের প্রকৃতি বিচার ক'রে প্রোটনের ব্যাসার্দ্ধ জানা সম্ভব। বাস্তবিকপক্ষে প্রোটনের ব্যাসার্দ্ধের পরিমাণ মোটামুটি শুদ্ধভাবেই জানা আছে, এই পরিমাণ হল $\sim 1{\cdot}3\times 10^{-13}$ সেণ্টিমিটার। সুতরাং এথেকে বোঝা যায় যে উপরোক্ত পদ্ধতি প্রোটনের ক্ষেত্রে অচল, প্রোটনকে শুধু একটি বিদ্যুতের বুদ্বুদ হিসাবে কল্পনা করা যায় না। কেন্দ্রীনের বলসমূহের সঙ্গেও প্রোটন ক্রিয়া করে এবং ঐসব বলগুলি বিদ্যুৎচুম্বকীয় বলের তুলনায় বহুগুণ বেশী শক্তিশালী, এইসব কারণে প্রোটনের প্রকৃতি যথেষ্ট জটিল।

প্রশ্নমালা

(1) ট্যাংস্টেনে আলোকবিদ্যুৎ-প্রক্রিয়া করণক্ষম সর্বোচ্চ তরঙ্গদৈর্ঘ্যের পরিমাণ 2300×10^{-8} সেমি, 1800×10^{-8} সেমি তরঙ্গদৈর্ঘ্যের বেগুনীপারের রশ্মি ট্যাংস্টেনের ভিতর থেকে যে আলোকবৈদ্যুতিক ইলেকট্রন নির্গত করবে তার শক্তি কত ? [1·49 ইভি]

(2) $1A^{\circ}$ তরঙ্গদৈর্ঘ্যবিশিষ্ট একটি বিদ্যুৎচুম্বকীয় বিকিরণের কোয়াণ্টামের স্পন্দনাঙ্ক এবং শক্তি কত ?

[$\nu=3\times10^{18}$/সেক ; $h\nu=1{\cdot}98\times10^{-8}$ আর্গ
অথবা $1{\cdot}24\times10^{4}$ ইভি]

(3) সোডিয়ামের আলোকবৈদ্যুতিক প্রান্তিক শক্তি 2·0 ইভি। 4000 A° তরঙ্গদৈর্ঘ্যের আলো সোডিয়াম ধাতুর পরিষ্কার উপরিতলে আপতিত হলে তার ফলে চরম কত শক্তির ফোটো-ইলেকট্রন নির্গত হবে ? ঐ ফোটো-ইলেকট্রনগুলির গতিবেগ কত ?

[$1{\cdot}8\times10^{-12}$ আর্গ ; $6{\cdot}3\times10^{7}$ সেমি/সেক]

(4) কতগুলি ধাতুর ক্ষেত্রে যেসব স্পন্দনাঙ্কে এদের আলোকবিদ্যুৎ-প্রক্রিয়া সবে শুরু হয় তাদের মান হ'ল যথাক্রমে *Al* 4770A°, *Cu* 3000A°, K 6000A°, W 2300A° ঐসব প্রত্যেক ক্ষেত্রে আলোকবৈদ্যুতিক প্রান্তিক শক্তির মান কত ? এইসব ধাতুগুলি যখন 1850A° তরঙ্গদৈর্ঘ্যের বেগুনীপারের আলোতে আলোকিত হয়, তখন বিভিন্ন ক্ষেত্রে থামান বিভবের পরিমাণ কত ?

[প্রান্তিক শক্তি : 2·60, 4·14, 2·07, 5·40 ইভি
থামান বিভব : 4·11, 2·57, 4·63, 1·31 ভোল্ট।]

(5) একটি হাইড্রোজেন অণু $2{\cdot}4\times10^{5}$ সেমি/সেকেণ্ড গতিবেগে চলছে, এর ডিব্রগলি তরঙ্গদৈর্ঘ্য কত ? একটি রাইফেল বুলেট যার ওজন 20 গ্রাম এবং গতিবেগ 400 মি/সেক, এর ডিব্রগলি তরঙ্গদৈর্ঘ্য কত ?

[0·82A°, $8{\cdot}3\times10^{-25}$A°]

(6) রঞ্জনরশ্মির একটি প্রবাহ লবণের স্ফটিকের উপর আপতিত হয়েছে (জালিপ্রসার $=2{\cdot}820\times10^{-8}$ সেমি)। যদি প্রথম রাগ প্রতিবিম্বন লক্ষ্য করা যায় $8^{\circ}\,35'$ উন্নতিকোণে তবে ঐ রঞ্জনরশ্মির তরঙ্গদৈর্ঘ্যের পরিমাণ কত ? কোন্ কোন্ কোণে দ্বিতীয় ও তৃতীয় রাগ প্রতিবিম্বন লক্ষিত হবে ?

[0·84 A°, 17°20′, 27°8′]

(7) সোডিয়াম তলের আলোকবৈদ্যুতিক প্রান্তিক শক্তি 2·0 ইভি। সর্বাধিক কত তরঙ্গদৈর্ঘ্যের আলো সোডিয়াম তল থেকে ফোটো ইলেকট্রন নির্গত করাবে ? [6210A°]

(8) 2536A° তরঙ্গদৈর্ঘ্যের পারদের রেখা রূপার ভিতর থেকে ফোটো-ইলেকট্রন নির্গত করাবার জন্য ব্যবহৃত হচ্ছে, নির্গত ইলেকট্রনগুলি থামিয়ে দিতে 0·11 ভোল্ট প্রয়োজন। রূপা থেকে ইলেকট্রন উৎখাত করতে ন্যূনতম কত শক্তি প্রয়োজন হয় তা ইভিতে নির্ণয় কর। [4·78 ইভি]

(9) সাধারণ লবণের স্ফটিকের মধ্যে দুটি পাশাপাশি সমতলের মধ্যে দূরত্বের পরিমাণ 2·820A°। যখন রঞ্জনরশ্মি এই সমতলশ্রেণীর ভিতর এসে পড়ে তখন দেখা যায় যে প্রথম ব্রাগ প্রতিবিম্বন ঘটে 8° 55′ কোণে। রঞ্জনরশ্মির তরঙ্গদৈর্ঘ্যের পরিমাণ কত ? কত কোণে দ্বিতীয় ব্র্যাগ প্রতিবিম্বন ঘটবে ? [0·842A°, 17° 22′]

(10) 1000 ইভি ইলেকট্রনের ডিব্রগলি তরঙ্গদৈর্ঘ্য কত ? [0·39A°]

(11) একটি প্রোটনের ডিব্রগলি তরঙ্গদৈর্ঘ্য 0·5A°, এর শক্তি ইলেকট্রন ভোল্টে নির্ণয় কর। [0·33 ইভি]

(12) 0·0055A° তরঙ্গদৈর্ঘ্যের গামারশ্মির দ্বারা ইলেকট্রন পজিট্রন জোড়া উৎপন্ন হয়। এই জোড়াটির গতিশক্তি এমইভিতে প্রকাশ কর। [1·25 এমইভি]

চতুর্থ অধ্যায়

পরমাণুর প্রকৃতি

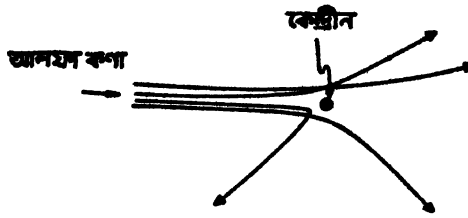
বহুকাল আগে থেকেই রসায়ন ও পদার্থবিজ্ঞানে পরমাণুতত্ত্ব অত্যন্ত দৃঢ় ভিত্তিতে স্থাপিত হয়েছিল কিন্তু পরমাণুর স্বরূপ সম্বন্ধে দীর্ঘকাল পর্যন্ত বিজ্ঞানীদের ধারণা ছিল অস্পষ্ট। পরমাণুর ভিতর ইলেকট্রনের অস্তিত্ব আছে এই তত্ত্বটি সাধারণভাবে স্বীকৃত হবার পর বিজ্ঞানীরা চিন্তা করতে আরম্ভ করলেন কিভাবে ইলেকট্রনগুলি সেখানে অবস্থান করতে পারে। যেহেতু পরমাণু সামগ্রিকভাবে আধানবিহীন, এর ভিতর সমসংখ্যক ধন-আধানবিশিষ্ট কণা যেমন প্রোটনের অস্তিত্ব থাকা প্রয়োজন। যদি ধন ও ঋণ-আধানবিশিষ্ট কণাগুলি পরমাণুর ভিতর সহাবস্থান করে তবে সহজেই ধারণা করা যায় যে, তড়িৎচুম্বকীয় বলগুলি পারমাণবিক প্রক্রিয়ায় এক বিশিষ্ট অংশ গ্রহণ করবে। জে. জে. টমসন, যিনি সর্বপ্রথম ইলেকট্রনের e/m অনুপাত মাপেন, তিনিই সর্বপ্রথম পরমাণুর জন্য একটি গঠনকল্প প্রস্তাব করেন। তাঁর মতে পরমাণু হ'ল একটি ধন-আহিত গোলকের মত যার অভ্যন্তরে ধন-আধান সর্বত্র সমভাবে ছড়িয়ে আছে, এই গোলকের ভিতরে ইলেকট্রনগুলি ইতস্ততঃ বিক্ষিপ্তভাবে নিহিত থাকে। কিন্তু শীঘ্রই এমন একটি পরীক্ষা করা হ'ল যা থেকে স্পষ্ট প্রমাণিত হয় যে, পরমাণুর গঠন সম্বন্ধে টমসনের এই ধারণা যুক্তিসঙ্গত নয় এবং এর গঠন আসলে সম্পূর্ণ অন্য ধরণের। এটি হ'ল রাদারফোর্ডের বিখ্যাত আলফাকণা বিচ্ছুরণের পরীক্ষা এবং আমরা এই পরীক্ষাটি সম্বন্ধে বিস্তৃতভাবে আলোচনা করব। কিন্তু তার আগে আলফাকণাদের সম্বন্ধে কিছু বলা প্রয়োজন।

গত শতাব্দীর শেষ দিকে বেকরেল (Becquerel) আবিষ্কার করেন যে, জগতে কিছু কিছু বিকিরণশীল পরমাণু আছে যাদের ভিতর থেকে সবসময়ই বিভিন্ন ধরণের বিকিরণ বেরিয়ে আসছে। এই বিকিরণশীল পদার্থগুলির মধ্যে ইউরেনিয়াম ও থোরিয়ামের নাম বিশেষভাবে উল্লেখযোগ্য। পরবর্তী কালে পরীক্ষায় প্রমাণিত হয় যে এই বিকিরণগুলি হ'ল আসলে ইলেকট্রন, উচ্চস্পন্দনাঙ্কের রঞ্জনরশ্মি যাকে এখন বলা হয় গামা রশ্মি, এবং একধরণের অপেক্ষাকৃত ভারী কণা যাদের বলা হয় আলফাকণা। পরবর্তী অধ্যায়গুলিতে পরমাণু-কেন্দ্রীন সম্বন্ধে আলোচনা করার সময় আমরা এই তিনপ্রকারের বিকিরণ

সম্বন্ধে আরও বিস্তৃতভাবে আলোচনা করব। এখানে শুধু বলা যেতে পারে যে, পরীক্ষার প্রমাণিত হয়েছে আলফাকণাগুলি হ'ল আসলে ধন-আহিত হিলিয়াম মৌলের কেন্দ্রীন, একটি আলফাকণার আধান দুটি প্রোটনের আধানের সমান, এর ভর প্রোটনের ভরের প্রায় চার গুণ। পরীক্ষাগারে এদের ভর ও e/m অনুপাত মাপা সম্ভব হয়েছে। আলফাকণাগুলি যখন কোন কেন্দ্রীনের ভিতর থেকে বেরিয়ে আসে তখন প্রায়শঃই এদের কয়েক এমইভি শক্তি থাকে, রাদারফোর্ড এই ভারী ও শক্তিশালী কণাগুলির দ্বারা বিক্ষুরণ ঘটিয়ে পরমাণুর গঠন নির্দ্ধারণে সাফল্যলাভ করেন।

রাদারফোর্ড একটি অত্যন্ত পাতলা সোনার পাতের ভিতর দিয়ে আলফা-কণাগুলিকে পরিচালিত ক'রে দেন এবং এই পাতের মধ্য থেকে কণাগুলি কিভাবে বিক্ষুরিত হচ্ছে তা লক্ষ্য করেন। সোনাকে পিটিয়ে অত্যন্ত পাতলা পাতে পরিণত করা যায় এবং রাদারফোর্ডের পরীক্ষায় যে পাত ব্যবহার করা হয়েছিল তার বেধ ছিল প্রায় 10^{-4} সেন্টিমিটার। কিন্তু এই স্বল্পপরিসরের মধ্যেও হাজার হাজার সোনার পরমাণুর ভর থাকতে পারে এবং জে. জে. টমসনের মতানুযায়ী যদি পরমাণুর ভিতর আধান ও ভর সর্ব্বত্র সমভাবে ছড়িয়ে থাকে তবে কল্পনা করা দুরূহ কিভাবে আলফাকণাগুলি অনায়াসেই ঐ সোনার পাত ভেদ ক'রে চলে যেতে পারে। বিক্ষুরিত কণাগুলি একটি প্রদীপনশীল পদার্থের পর্দার উপর এসে পড়ায় ফলে তার দ্বারা যে চমকের সৃষ্টি হয় তা একটি অন্ধকার কক্ষের ভিতর অণুবীক্ষণের দ্বারা লক্ষ্য করা হয়েছিল। বলা বাহুল্য যে, এরকম বিক্ষুরণের পরীক্ষায় সমস্ত আয়োজনটি একটি বায়ুশূন্য কক্ষের ভিতর রাখতে হয় যাতে বাতাসের অণুগুলির সঙ্গে সংঘর্ষে আলফাকণার কোন বিচ্যুতি না ঘটতে পারে। সোনার পরমাণুর দ্বারা বিক্ষুরিত হবার ফলে কণাগুলি বিভিন্ন কোণে বিচ্যুত হয় এবং কোন একটি নির্দ্দিষ্ট কোণে কতগুলি কণা বিক্ষুরিত হয়ে আসছে সেই সংখ্যা পরীক্ষায় মাপা হয়। রাদারফোর্ডের পরীক্ষায় দেখা যায় যে, অধিকাংশ আলফাকণাই বিশেষ বিচ্যুত না হয়ে পাতটির ভিতর দিয়ে সোজাসুজি বেরিয়ে আসছে, তবে আবার অল্পসংখ্যক কিছু কণা অতিবৃহৎ কোণেও বিক্ষুরিত হচ্ছে। এমন কি কিছু কিছু কণা 90°-এর চেয়েও অধিক কোণে বিক্ষুরিত হয়ে থাকে (4·1 চিত্র দ্রষ্টব্য)

কিছু কিছু কণা যে অতিবৃহৎ কোণে বিক্ষুরিত হচ্ছে তাথেকে প্রমাণিত হয় পরমাণুর ভিতর কোন অঞ্চলে অত্যন্ত তীব্র ধন-আধানজনিত বৈদ্যুতিক ক্ষেত্রের অস্তিত্ব আছে, কারণ তা না হলে আলফাকণা যা প্রোটনের প্রায় চারগুণ ভারী, এর পক্ষে এত বৃহৎ কোণে বিক্ষুরিত হওয়া সম্ভব নয়।

পরীক্ষা থেকে আরও প্রমাণিত হয় যে, ঐ অঞ্চলটির ভর আলফাকণার তুলনায় অনেক বেশী, কারণ বিচ্ছুরিত আলফাকণার শক্তির পরিবর্তন হয় সাধারণতঃ খুবই সামান্য। জে. জে. টমসনের ধারণা অনুযায়ী পরমাণুর ভিতর সর্বত্রই ধন ও ঋণ-আধান সমভাবে ছড়িয়ে থাকলে কোথাও অস্বাভাবিক তীব্র বৈদ্যুতিকক্ষেত্রের অস্তিত্ব থাকা সম্ভব নয়। সুতরাং রাদারফোর্ডের পরীক্ষায়

চিত্র 4·1—কেন্দ্রীনের উপর আলফাকণার কুলম্ব বিচ্ছুরণ।

প্রমাণিত হয় যে পরমাণুর ভিতর বিপরীতধর্মী আধান সর্বত্র সমভাবে ছড়িয়ে নেই, কোথাও অন্ততঃ ধন-আধান অতিমাত্রায় জমে আছে যার ফলে সৃষ্ট বৈদ্যুতিকক্ষেত্র আলফাকণাগুলিকে বৃহৎ কোণে বিচ্যুত করছে। কিন্তু এই বিচ্যুতি ঘটছে অতি স্বল্পসংখ্যক কয়েকটি কণার, অধিকাংশ কণাই বিশেষ বিচ্যুত না হয়ে সোনার পাত ভেদ ক'রে সরাসরি বেরিয়ে যায়। এথেকে প্রমাণ হয় যে, পরমাণুর ভিতর যে অঞ্চলে তীব্র বৈদ্যুতিকক্ষেত্র বর্তমান তার আয়তন খুবই সামান্য। পরীক্ষার ফলাফল বিশ্লেষণ ক'রে এই অঞ্চলের আয়তন সম্বন্ধে স্পষ্ট ধারণা করা যায়। এই অঞ্চলের ব্যাসার্দ্ধ সাধারণতঃ 10^{-12} থেকে 10^{-13} সেমি পর্য্যন্ত হয়ে থাকে। এর সঙ্গে তুলনীয় গ্যাস-বলবিজ্ঞান থেকে প্রাপ্ত পরমাণুর ব্যাসার্দ্ধের পরিমাণ 10^{-8} সেমি। এই দুই পরিমাণ তুলনা করলে বোঝা যায় যে পরমাণুর ভিতর অধিকাংশ স্থানই শূন্য এবং এর ভিতর একটি স্বল্পপরিসর স্থান যার আয়তন সমগ্র পরমাণুর আয়তনের তুলনায় নগণ্য, তার মধ্যেই পরমাণুর সমস্ত ধন-আধান এবং প্রায় সমস্ত ভর কেন্দ্রীভূত থাকে।

রাদারফোর্ডের পরীক্ষা : গাণিতিক তত্ত্ব

রাদারফোর্ড বিচ্ছুরণ প্রক্রিয়ার গাণিতিক তত্ত্ব গড়ে তুলতে গিয়ে আমরা প্রথমে পরমাণুর গঠন সম্বন্ধে উপরোক্ত ধারণাগুলি মোটামুটি সত্য ব'লে ধরে নেব, পরে পরীক্ষার ফলাফলের সঙ্গে এই তত্ত্ব থেকে প্রাপ্ত ফলাফল বিচার করলে ঐসব প্রকল্পগুলির যথার্থতা যাচাই করা সম্ভব হবে। প্রকল্পগুলি হ'ল সংক্ষেপে এই : (i) পরমাণুর ভিতর কেন্দ্রীন নামক একটি অতিশয় ক্ষুদ্র অঞ্চল

আছে যার ভিতর সমস্ত ধন-আধান কেন্দ্রীভূত রয়েছে, ইলেকট্রনগুলি কেন্দ্রীনের বহুদূরে অবস্থান করে। কেন্দ্রীনের কুলম্ব বলের প্রভাবের দ্বারাই আলফাকণার বিক্ষুরণ ঘটে। (ii) কেন্দ্রীনের ভর আলফাকণার তুলনায় অনেক বেশী, এজন্য বিক্ষুরণ প্রক্রিয়ায় কেন্দ্রীনের ভিতর যে ভরবেগ সঞ্চারিত হয় তা অতি সামান্য। সুতরাং আলফাকণার গতিশক্তি বিক্ষুরণের পূর্বে এবং পরে প্রায় অভিন্ন থাকে। (iii) ইলেকট্রনের ভর অতিসামান্য এবং এরা কেন্দ্রীনের বহুদূরে থাকে এজন্য বিক্ষুরণ প্রক্রিয়ায় এদের প্রভাব নগণ্য। (iv) সোনার পাত অতিক্রম করার সময় আলফাকণাটির পক্ষে একের অধিক কেন্দ্রীনের দ্বারা বিক্ষুরিত হবার সম্ভাবনা নগণ্য, যাতে একাধিক কেন্দ্রীনের সঙ্গে সংঘর্ষ না ঘটে তার জন্যই ঘাতবহের পাতটিকে এত পাতলা করা হয়। (v) কেন্দ্রীন ও আলফাকণা উভয়েরই আয়তন অতি সামান্য, এজন্য এদের দুটি বিন্দু হিসাবে কল্পনা করা চলে।

4·2 চিত্রে, ধরা যাক বিক্ষুরক কেন্দ্রীনটি O বিন্দুতে আছে এবং আলফাকণাটি বহুদূর থেকে O বিন্দুর দিকে একটি ঘাতরাশি (impact parameter) h_0 নিয়ে অগ্রসর হচ্ছে। এই h_0 হ'ল O এবং কণাটির গতিপথের দিকের মধ্যে লম্বদূরত্ব, অর্থাৎ 4·2 চিত্রে OX রেখা এবং প্রাথমিক গতিবেগ ভেক্টর $\vec{v}_0$ এর মধ্যে লম্বদূরত্ব। ঘাতবহ কেন্দ্রীনটি সবসময়ই স্থির থাকে, বিক্ষুরিত আলফাকণাটির প্রাথমিক ও প্রান্তিক গতিশক্তি যদিও অভিন্ন কিন্তু প্রান্তিক গতির দিক, OX-এর সঙ্গে কোন এক θ কোণে অবস্থান করবে। এই কোণটি বিক্ষুরণের পরীক্ষায় মাপা হয়। বলবিজ্ঞানের প্রয়োগ দ্বারা সহজেই দেখান যায় যে, এইরকম স্থির বিক্ষুরক থেকে কুলম্ব বলের দ্বারা বিক্ষুরণ ঘটলে বিক্ষুরিত কণাটির গতিপথ হয় একটি পরাবৃত্ত, 4·2 চিত্রেও গতিপথটি এজন্য পরাবৃত্ত হিসাবে দেখান হয়েছে।

কণাটির গতিপথের উপর O-এর নিকটবর্তী একটি বিন্দু P নেওয়া যাক এবং O থেকে P-তে আমরা একটি ব্যাসার্ধ ভেক্টর আঁকতে পারি যেটি OX রেখার সঙ্গে ϕ কোণে অবস্থান করে (চিত্র 4·2)। P বিন্দুতে কণাটির গতিবেগ v এবং এর দিক হ'ল ঐ বিন্দুতে কণাটির গতিপথের উপর স্পর্শকের দিক বরাবর। এই v ভেক্টরটি দুটি উপাংশে বিভক্ত করা যায়, এদের মধ্যে v_x, OX-এর সমান্তরাল এবং v_y, OX-এর লম্ব বরাবর থাকে। কুলম্ব বল যা ব্যাসার্ধ ভেক্টর r বরাবর ক্রিয়া করছে তার পরিমাণ হ'ল

$$F = \frac{Z_1 Z_2 e^2}{r^2} \qquad \ldots \qquad \ldots \qquad 4·1$$

এখানে Z_1e এবং Z_2e যথাক্রমে ধাতবহ কেন্দ্রীন ও আপতিত কণার আধান। বলের যে উপাংশটি OX-এর উপর লম্ব অর্থাৎ যেটি কণাটিকে এর প্রাথমিক গতিপথ থেকে বিচ্যুত করে তার পরিমাণ F sin ϕ এবং নিউটনের দ্বিতীয় সূত্র থেকে আমরা পাই

$$m\frac{dv_y}{dt}=\frac{Z_1Z_2e^2}{r^2}\sin\phi \quad \cdots \quad 4.2$$

কৌণিক ভরবেগ সংরক্ষণের সূত্র প্রয়োগ ক'রে সহজেই এই সমীকরণটিকে একটি সমাকলনক্ষম অবস্থায় প্রকাশ করা যায়। কৌণিক ভরবেগ সংরক্ষণ নীতি প্রয়োগ করা যায় নিম্নলিখিত যুক্তির অবতারণা ক'রে : কুলম্ব বল একটি কেন্দ্রীয় বল, এটি ব্যাসার্দ্ধ ভেক্টর বরাবর 'O'-এর দিকে অথবা এর বিপরীত দিকে ক্রিয়াশীল ; এই কেন্দ্রীয় বলটিকে আমরা নিম্নলিখিত উপায়ে উপস্থাপিত করতে পারি

$$F=\hat{r}f(r)$$

এখানে $\hat{r}$ হ'ল $\vec{r}$ ভেক্টরের দিকে একক ভেক্টর এবং $f(r)$ শুধুমাত্র $r=|\vec{r}|$ এর অপেক্ষক। এই পরিস্থিতিতে যদি O বিন্দুর পরিপ্রেক্ষিতে এই কেন্দ্রীয় বলটির ভ্রামক (moment) নির্দ্ধারণ করি তবে আমরা পাব

$$N=\vec{r}\times\hat{r}f(r)=r\,f(r)\hat{r}\times\hat{r}=0$$

অর্থাৎ বিচ্ছুরক কেন্দ্রীনটির পরিপ্রেক্ষিতে ক্রিয়াশীল ভ্রামকের পরিমাণ শূন্য। বলবিজ্ঞানে কৌণিক ভরবেগের সংজ্ঞা হ'ল $\vec{J}=\vec{r}\times\vec{p}$, এখানে $\vec{r}$, O বিন্দুকে কেন্দ্র করে কণাটির ব্যাসার্দ্ধ ভেক্টর এবং $\vec{p}$ কণাটির ভরবেগ। এই সংজ্ঞা অনুসরণ ক'রে সহজেই দেখান যায় যে, একটি পরিক্রিয়াশীল সমবায়ের (interacting system) মধ্যে ক্রিয়াশীল মোট ভ্রামকের পরিমাণ যদি শূন্য হয় তবে ঐ সমবায়ের মোট কৌণিক ভরবেগ হবে একটি ধ্রুবক। আমাদের বর্ত্তমান সমস্যায় O-এর পরিপ্রেক্ষিতে ভ্রামকের পরিমাণ শূন্য, সুতরাং আলফাকণা-কেন্দ্রীন এই সমবায়ের মোট কৌণিক ভরবেগ একটি ধ্রুবক অর্থাৎ সময়ের সঙ্গে এর কোন পরিবর্ত্তন হবে না। এই নীতিটি বদ্ধ (যেমন বৃত্তীয় অথবা উপবৃত্তীয়) অথবা মুক্ত (যেমন পরাবৃত্তীয়) উভয় প্রকার কক্ষপথগুলির ক্ষেত্রেই প্রযোজ্য।

আপতিত কণাটির গতিবেগ যখন v_0 তখন কৌণিক ভরবেগের পরিমাণ হবে $|\vec{v}\times\vec{r}|=v_0h_0$। আবার কণাটি যখন P বিন্দুতে আসে তখন একই-

অতএব কৌণিক ভরবেগ $=vh$; h_0 এবং h দূরত্বদ্বয় চিত্রটিতে দেখান হয়েছে। যদি P বিন্দুতে $\vec{r}$ এবং $\vec{v}$ ভেক্টরদ্বয়ের মধ্যে কোণ হয় α তবে

$$h = r \sin \alpha \qquad \cdots \quad 4{\cdot}3$$

গতিবেগের উপাংশ যা r-এর উপর লম্ব, সেটিকে নিম্নলিখিত উপায়ে লেখা যায়

$$v \sin \alpha = r\frac{d\phi}{dt} \qquad \cdots \quad 4{\cdot}4$$

এথেকে vh রাশিটি r এবং ϕ এর মাধ্যমে লেখা যায় এবং কৌণিক ভরবেগ সংরক্ষণের সূত্র প্রয়োগ ক'রে আমরা পাই

$$v_0 h_0 = vh = r^2 \frac{d\phi}{dt}$$

এবার আমরা 4·2 সমীকরণটির জন্য লিখতে পারি

$$m\frac{dv_y}{dt} = \frac{Z_1 Z_2 e^2}{v_0 h_0} \cdot \sin \phi \cdot \frac{d\phi}{dt}$$

সুতরাং

$$v_y = \frac{Z_1 Z_2 e^2}{m v_0 h_0} \int_0^{\phi} \sin \phi \, d\phi \qquad \cdots \quad 4{\cdot}5$$

চিত্রটি থেকে আমরা দেখি যে প্রান্তিক বিচ্যুতি কোণটি হবে $\phi_f = \pi - \theta$, সুতরাং

$$v_y^{\text{চরম}} = \frac{Z_1 Z_2 e^2}{m v_0 h_0} \int_0^{\pi-\theta} \sin \phi \, d\phi$$

$$= \frac{Z_1 Z_2 e^2}{m v_0 h_0}(1 + \cos \theta) \qquad \cdots \quad 4{\cdot}6$$

বিক্ষুরণের ফলে আলফাকণার শক্তির কোন পরিবর্তন ঘটে না। আলফাকণার প্রাথমিক গতিবেগ v_0, এবং প্রান্তিক দিক Ox-এর সঙ্গে θ কোণে থাকে, সুতরাং এথেকে আমরা লিখতে পারি

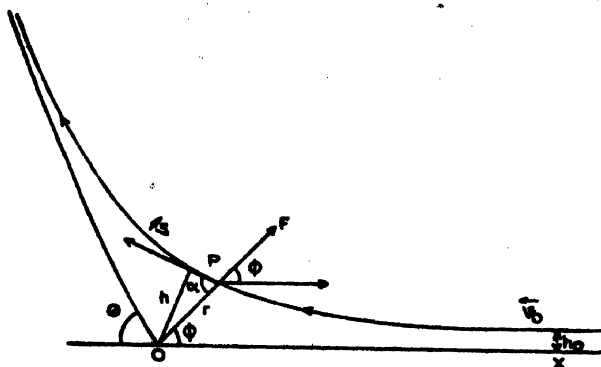
$$v_y^{\text{চরম}} = v_0 \sin \theta \qquad \cdots \quad 4{\cdot}7$$

4·6 ও 4·7 সমীকরণদ্বয়ের ডানদিকের রাশিদ্বয় পরস্পর সমান ধরলে আমরা পাই

$$2v_0 \sin \tfrac{1}{2}\theta \cos \tfrac{1}{2}\theta = \frac{Z_1 Z_2 e^2}{m v_0 h_0} 2 \cos^2 \tfrac{1}{2}\theta$$

এথেকে

$$h_0 = \frac{Z_1 Z_2 e^2}{m v_0^2} \cot\frac{\theta}{2} = \frac{b}{2}\cot\frac{\theta}{2}$$

$$b = \frac{2 Z_1 Z_2 e^2}{m v_0^2} \qquad \cdots \quad 4{\cdot}8$$

চিত্র 4·2—কেন্দ্রীনের নিকটে আলফাকণার গতিপথের চিত্র।

4·8 সমীকরণটি ঘাতরাশি h_0 এবং বিচ্ছুরণ কোণ θ-এর ভিতর রাদারফোর্ড প্রদত্ত বিখ্যাত সম্বন্ধ। এটির সাহায্যে মোট নিক্ষিপ্ত আলফাকণার কত অংশ একটি নির্দিষ্ট θ কোণে বিচ্ছুরিত হয়ে যাবে তা সহজেই গণনা করা যায়। মনে করা যাক আলফাকণার একটি ধারা লম্বভাবে একটি খুব পাতলা ধাতবহের পাতের উপর এসে পড়ছে যার বেধ t এবং যেখানে প্রতি একক ঘনায়তনের ভিতর পরমাণুর সংখ্যা n। পাতটি এতই পাতলা যে সাধারণতঃ অধিকাংশ কণাই এর ভিতর আদৌ বিচ্যুত না হয়ে চলে যাবে, শুধু সামান্য কিছু-সংখ্যক কণাই কেবল বিচ্ছুরিত হবে। মনে করা যাক একক বর্গায়তনের উপর আপতিত কণার সংখ্যা প্রতি সেকেণ্ডে M, এবং এদের মধ্যে মোট কণার সংখ্যা যেগুলি একটি কেন্দ্রীনের h_0 দূরত্বের মধ্য দিয়ে যায়, M′। সুতরাং একটি কণা যে কোন একটি কেন্দ্রীনের h_0 দূরত্বের মধ্য দিয়ে যাবে তার সম্ভাব্যতা হ'ল

$$q = \frac{M'}{M} = \pi h_0^2 n t \qquad \cdots \quad 4{\cdot}9$$

একটি আলফাকণা যদি এমনভাবে অগ্রসর হয় যে এটি একটি কেন্দ্রীনের h_0 দূরত্বের মধ্যে গিয়ে পড়ে তবে ঐ কণাটি θ অপেক্ষা অধিক কোণে বিচ্ছুরিত

হবে। 4·8 ও 4·9 সমীকরণ থেকে θ অপেক্ষা অধিক কোণে বিক্ষুরিত হয়ে যাবার সম্ভাব্যতা হ'ল

$$q = \tfrac{1}{4}\pi\, nt\, b^2 \cot^2 \frac{\theta}{2} \qquad \cdots \quad 4{\cdot}10$$

θ এবং $\theta + d\theta$-এর মধ্যে বিক্ষিপ্ত হবার সম্ভাব্যতা, h_0 এবং $h_0 + dh_0$-এর মধ্যে বিক্ষুরিত হবার সম্ভাব্যতার সমান এবং নিম্নলিখিত সূত্রের দ্বারা প্রদত্ত

$$\begin{aligned} dq &= 2\pi h_0\, nt\, dh_0 \\ &= \tfrac{1}{4}\pi\, nt\, b^2 \cot \frac{\theta}{2} \operatorname{cosec}^2 \frac{\theta}{2}\, d\theta \\ &= \tfrac{1}{8}\pi\, nt\, b^2 \sin\theta \operatorname{cosec}^4 \frac{\theta}{2}\, d\theta \qquad \cdots \quad 4{\cdot}11 \end{aligned}$$

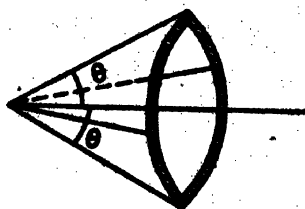
পরীক্ষায় বিক্ষুরক থেকে R দূরত্বে রাখা একটি জিঙ্ক সালফাইডের পর্দার উপর ধ্রুব আয়তনের মধ্যে লম্বালম্বিভাবে আপতনশীল আলফাকণাগুলি গণনা করা হয়। সুতরাং R দূরত্বে রাখা একটি পর্দার একক বর্গায়তনের (unit area) উপর লম্বালম্বিভাবে এসে পড়ার সম্ভাব্যতা হ'ল (চিত্র 4·3)

$$\frac{dq}{2\pi R^2 \sin\theta\, d\theta} = \frac{nt\, b^2 \operatorname{cosec}^4 \frac{\theta}{2}}{16R^2}$$

মোট M-সংখ্যক আলফাকণা ঘাতবহ (target) পাতের উপর এসে পড়ে, এদের মধ্যে Y-সংখ্যক বিক্ষুরিত কণা জিঙ্ক সালফাইডের প্লেটের উপর একক বর্গায়তনে লম্বভাবে এসে পড়ে ; ঐ প্লেটটি যদি R দূরত্বে এবং প্রাথমিক কণার গতিপথের সঙ্গে θ কোণে থাকে তবে

$$\begin{aligned} Y &= \frac{Mntb^2 \operatorname{cosec}^4 \frac{\theta}{2}}{16R^2} \\ &= \left(\frac{4Ze^2}{mv_0^2}\right)^2 \frac{Mnt}{16R^2} \operatorname{cosec}^4 \frac{\theta}{2} \qquad \cdots \quad 4{\cdot}12 \end{aligned}$$

4·12 সূত্রে আলফাকণার আধান $2e$ এবং কেন্দ্রীনের আধান Ze লেখা হয়েছে।

সুতরাং আমরা দেখি যে, রাদারফোর্ড তত্ত্বে যে সংখ্যক কণা R দূরে রাখা একক ক্ষেত্রফলে এসে পড়ে সেগুলি নিম্নলিখিত রাশিগুলির সমানুপাতী হবে

চিত্র 4·3

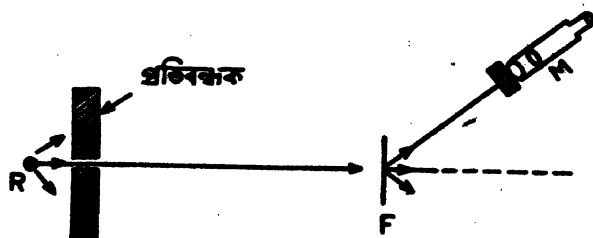
(1) $\operatorname{cosec}^4 \frac{\theta}{2}$, যেখানে θ বিচ্ছুরণ কোণ

(2) t, বিচ্ছুরক পাতের পুরুত্ব

(3) $\frac{1}{(mv_0^2)^2}$, প্রাথমিক শক্তির বর্গের ব্যস্তরাশি

(4) $(Ze)^2$, কেন্দ্রীনের আধানের বর্গ।

রাদারফোর্ড তত্ত্বের পরীক্ষামূলক বিচার

গাইগার এবং মার্সডেন (Geiger & Marshden)* আলফা বিচ্ছুরণের পরীক্ষা ক'রে রাদারফোর্ড তত্ত্বটির সত্যাসত্য বিচার করেন। বিভিন্ন কোণে

চিত্র 4·4
আলফাকণার বিচ্ছুরণ পরীক্ষার আয়োজন।

বিচ্ছুরিত কণার সংখ্যা নির্ণয়ের জন্য 4·4 চিত্রের আয়োজনের ব্যবস্থা করা হয়। ছকের R চিহ্নিত অঞ্চলে একটি তেজস্ক্রিয় আলফা-বিকিরক পদার্থ যেমন রেডিয়াম রাখা হয়। F একটি খুব পাতলা ধাতুর পাত যার ভিতর বিচ্ছুরণ ঘটে এবং বিচ্ছুরিত কণাগুলি একটি জিঙ্ক সালফাইড মাখান পর্দার

* H. Geiger and E. Marshden, Phil. Mag. 21, 669 (1911)

উপর এসে পড়ে। ঐ পর্দার সম্মুখে একটি অণুবীক্ষণ M বসান থাকে। উৎস এবং যাতবহ নির্দিষ্টস্থানে স্থিরভাবে বসান থাকে, পর্দা এবং অণুবীক্ষণটি একটি বায়ুশূন্য ধাতুর প্রকোষ্ঠের ভিতরে ঘোরান যায় এবং এইভাবে বিচ্ছুরণ কোণ পরিবর্তিত করা যায়। এক নির্দিষ্ট সময়ের মধ্যে কতগুলি আলফাকণা পর্দার একক বর্গায়তনের উপর এসে পৌঁছায় তা নির্ণয় করা হয় পর্দার উপর চমকের সংখ্যা গণনা ক'রে। গাইগার ও মার্সডেনের পরীক্ষায় অণুবীক্ষণের দ্বারা চোখে দেখে এই গণনা করা হয়েছিল। প্রথম পরীক্ষায় শুধু বিচ্ছুরণ কোণের পরিবর্তন করা হয়, অন্যান্য সমস্ত রাশিগুলি অক্ষুণ্ণ রেখে। চমকের সংখ্যা N বা Y-এর সমানুপাতী, তা হবে $\operatorname{cosec}^4 \theta/2$-এর সমানুপাতী, অর্থাৎ $N/\operatorname{cosec}^4 \theta/2$ অনুপাতটি সমস্ত বিচ্ছুরণ কোণের জন্যই হবে একটি ধ্রুবক, কারণ পরীক্ষাধীন অবস্থায় 4·12 সূত্রে আবির্ভূত অন্যান্য রাশিগুলি ধ্রুব থাকে।

গাইগার ও মার্সডেন একটি পাতলা সোনার পাতের দ্বারা বিচ্ছুরণ ঘটিয়ে একাধিক বিচ্ছুরণ কোণের জন্য N-এর পরিমাণ মাপেন। $\operatorname{cosec}^4 \theta/2$ রাশিটি θ-এর অপেক্ষক হিসাবে অত্যধিক পরিমাণে পরিবর্তিত হয়। 4·1 সারণীতে বিভিন্ন বিচ্ছুরণ কোণের জন্য মাপা N, $\operatorname{cosec}^4 \theta/2$ এবং এদের অনুপাতের একটি তালিকা দেওয়া হয়েছে, এটি গাইগার এবং মার্সডেনের পরীক্ষালব্ধ। দেখা যাচ্ছে যে, যখন $\theta = 150°$ তখন $\operatorname{cosec}^4 \theta/2 = 1.15$, যখন $\theta = 15°$ তখন $\operatorname{cosec}^4 \theta/2 = 3445$। এই দুই কোণের সীমার মধ্যে N-এর পরিমাণও বিপুল পরিমাণে পরিবর্তিত হয় কিন্তু এদের অনুপাতের মান মোটামুটি ধ্রুব থাকে; যে সামান্য পরিবর্তন ঘটে তা পরীক্ষার অন্তর্গত ভুলের সম্ভাবনার অভ্যন্তরেই থাকে। গাইগার ও মার্সডেনের পর স্যাডউইক আরও নির্ভুলভাবে এই পরীক্ষাটি সম্পন্ন ক'রে রাদারফোর্ড তত্ত্বের সত্যতা নিঃসংশয়ে প্রমাণ করেন।

4·1 সারণী ঃ সোনার পাতের উপর বিচ্ছুরিত আলফাকণার সংখ্যা ও বিচ্ছুরণ কোণের ভিতর সম্বন্ধ

বিচ্ছুরণ কোণ	$\operatorname{cosec}^4\theta/2$	কোন নির্দিষ্ট পরিমাণ সময়ের ভিতর চমকের সংখ্যা (N)	$N/\operatorname{cosec}^4\theta/2$
150	1·15	33·1	28·8
135	1·38	43·0	31·2
120	1·79	51·9	29·0
105	2·53	69·5	27·5
75	7·25	211	29·1
60	16·0	477	29·8
45	46·6	1435	30·8
37·5	93·7	3300	35·3
30	223	7800	35·0
22·5	690	27300	39·6
15	3445	132000	38·4

কেন্দ্রীনের আধান

4·12 সূত্র থেকে আমরা দেখি যে, বিচ্ছুরণ কেন্দ্রীনের আধানের বর্গের সমানুপাতী, সুতরাং এর সাহায্যে আপতিত কণার সংখ্যা M এবং বিচ্ছুরিত কণার সংখ্যা Y গণনা ক'রে কেন্দ্রীনের আধান নির্ণয় করা যায়। তাছাড়া বিভিন্ন পদার্থে তৈরী ঘাতবহের দ্বারা যে বিচ্ছুরণ ঘটে সেগুলি পর্য্যালোচনা ক'রেও কেন্দ্রীনের আধান তুলনামূলকভাবে নির্ণয় করা যায়। প্রাথমিক পরীক্ষাগুলিতে এই দুই ধরণের পরীক্ষাই করা হয়েছিল এবং তাথেকে দেখা গেল যে, যেসব মৌলগুলি অ্যালুমিনিয়ামের তুলনায় ভারী তাদের ক্ষেত্রে কেন্দ্রীনের ধন-আধান Ze হ'ল মোটামুটি $\frac{1}{2}Ae$, যেখানে A ঐ মৌলের পারমাণবিক ভর এবং e ইলেকট্রনের আধান। প্রাথমিক পরীক্ষাগুলি খুব

নির্ভুল ছিল না। পরে স্যাডউইক উন্নত যন্ত্র সহকারে আধান নির্ণয়ের পরীক্ষাগুলি আবার করেন। এঁর পরীক্ষায় প্ল্যাটিনাম, রূপা এবং তামার জন্য নিম্নলিখিত পরিমাণের কেন্দ্রীনস্থ আধান Z নিরূপিত হয়

তামা : $Z = 29{\cdot}3 \pm 0{\cdot}5$

রূপা : $Z = 46{\cdot}3 \pm 0{\cdot}7$

প্ল্যাটিনাম : $Z = 77{\cdot}4 \pm 1{\cdot}0$

অবশ্য Z-এর পরিমাণ হবে একটি পূর্ণসংখ্যা, কিন্তু এইসব পরীক্ষায় অনিশ্চয়তার পরিমাণ এত বেশী যে ঠিক ঐ সংখ্যাটি কত তা নির্ণয় করা খুব সহজ নয়। তবে পর্যায় সারণীতে উপরোক্ত তিনটি ধাতুর পারমাণবিক সংখ্যা যথাক্রমে 29, 47 এবং 78 এবং উপরোক্ত Z-এর পরিমাণগুলিও এদের খুবই নিকটবর্তী। এভাবেই প্রথম পারমাণবিক সংখ্যা ও কেন্দ্রীনের আধানের পরিমাণ যে পরস্পর অভিন্ন তা পরীক্ষামূলকভাবে নির্দেশ করা সম্ভব হয়। সমসাময়িক অপর একটি পদ্ধতিতে মোজলি (Moseley) পরমাণুর রঞ্জনরশ্মি বর্ণালী পরীক্ষা ক'রে পারমাণবিক সংখ্যা নিরূপণের অপর একটি উপায় উদ্ভাবন করেন। মোজলির পরীক্ষা পরবর্তী একটি অধ্যায়ে আলোচিত হবে, এই পরীক্ষালব্ধ ফলাফলও স্যাডউইকের পরীক্ষালব্ধ কেন্দ্রীনের আধানের পরিমাণের সঙ্গে সামঞ্জস্যপূর্ণ। রাদারফোর্ডের তত্ত্বের প্রয়োগের মাধ্যমেই প্রথম কেন্দ্রীনের আধান নিরূপণের একটি সরাসরি উপায় আবিষ্কৃত হয়।

কেন্দ্রীনের ব্যাসার্ধ

আলফা বিচ্ছুরণের পরীক্ষার ফলাফল বিশ্লেষণ ক'রে কেন্দ্রীনের ব্যাসার্ধের পরিমাণ সম্বন্ধে মোটামুটি নির্ভুল ধারণা করা সম্ভব হয়। কেন্দ্রীনের কত নিকট পর্যন্ত কুলম্ব বলের সূত্রটি প্রযুক্ত হতে পারে তা অনুধাবন ক'রে কেন্দ্রীনের ব্যাসার্ধের পরিমাণ সম্বন্ধে জানা যায়। যদি কেন্দ্রীন থেকে যথেষ্ট দূরত্বে অগ্রসরমান আলফাকণাটির গতিবেগ হয় v_0 এবং এর নিকটতম দূরত্বে এসে এই গতিবেগ হয় v, তবে নিম্নলিখিত সম্বন্ধটি লেখা চলে

$$\tfrac{1}{2}mv_0^2 = \tfrac{1}{2}mv^2 + \frac{2Ze^2}{s} \qquad \cdots \quad 4{\cdot}13$$

এখানে s হ'ল নিকটতম অগ্রসর দূরত্ব। আমাদের পূর্ববর্তী আলোচনায় আমরা যে 'b' রাশিটি নির্দেশ করেছিলাম তা হ'ল কোন একটি কণা যদি "সোজাসুজি" কেন্দ্রীনের অভিমুখে অগ্রসর হতে থাকে তবে সেটি যে দূরত্ব পর্যন্ত

অগ্রসর হতে পারে আর পরিমাণ, কারণ 4·13 সূত্র থেকে যখন $v=0$ তখন $s=b=\frac{4Ze^2}{mv_0^2}$। এভাবে দেখা যায় যে, একটি 7·00 এমইভি আলফাকণা তামার কেন্দ্রীনের নিকটে $1{\cdot}2\times10^{-12}$ সেমি পর্যন্ত অগ্রসর হতে পারে। একটি নির্দিষ্ট শক্তির আলফাকণার দ্বারা ব্যবহার ক'রে পরীক্ষার দ্বারা আমরা নির্ণয় করতে পারি যে ঐ শক্তির আলফাকণার জন্য রাদারফোর্ড বিক্ষুরণ সূত্র প্রতিপালিত হচ্ছে কিনা, তারপর ঐ শক্তির জন্য 'b'-এর পরিমাণ নির্ণয় ক'রে কেন্দ্রীনের নিকটে কত দূরত্ব পর্যন্ত কুলম্ব বলের সূত্র কার্য্যকরী থাকছে তা জানা সম্ভব হয়। রাদারফোর্ড এবং তাঁর সহকর্মিবৃন্দ ব্যাপক পরীক্ষার দ্বারা $1/r^2$ সূত্র কত দূরত্ব পর্যন্ত প্রতিপালিত হয় দেখতে চেষ্টা করেন। তাঁদের পরীক্ষা থেকে জানা যায় যে, রূপার জন্য কুলম্ব সূত্র 2×10^{-12} সেমি দূরত্ব পর্য্যন্ত কার্য্যকরী থাকে, তামার জন্য ঐ দূরত্ব নির্ণীত হয় $1{\cdot}2\times10^{-12}$ সেমি এবং সোনার জন্য $3{\cdot}2\times10^{-12}$ সেমি। কেন্দ্রীনের নিকটে যে অঞ্চলে কুলম্ব বলের সূত্র আর কার্য্যকরী থাকে না তার ব্যাসার্দ্ধকেই যদি আমরা কেন্দ্রীনের ব্যাসার্দ্ধ ব'লে স্বীকার করি তবে এই ধরণের বিক্ষুরণের পরীক্ষা হ'ল ঐ ব্যাসার্দ্ধ নির্ণয় করার একটি প্রকৃষ্ট উপায়। রূপা, তামা এবং সোনার ক্ষেত্রে আমরা বলতে পারি যে, এদের কেন্দ্রীনের ব্যাসার্দ্ধ উপরোক্ত পরিমাণগুলির তুলনায় কম। এভাবে রাদারফোর্ডের পরীক্ষা থেকে নানাবিধ কেন্দ্রীনের ব্যাসার্দ্ধের ঊর্দ্ধতম সীমা নির্ণয় করা সম্ভব হয়েছে।

এভাবে আমরা দেখি যে, এই মৌলগুলির কেন্দ্রীনের ব্যাসার্দ্ধ প্রায় 10^{-12} সেমি। সত্যিসত্যিই যে আলফাকণাগুলি কেন্দ্রীনের এত নিকটে আসতে পারে যে অঞ্চলে কুলম্ব বলের সূত্র আর কার্য্যকরী থাকে না তাও রাদারফোর্ডের পরীক্ষায় প্রমাণ করা সম্ভব হ'ল। এটি প্রমাণ করা গেল অ্যালুমিনিয়ামের উপর আলফাকণার বিক্ষুরণ ঘটিয়ে, অ্যালুমিনিয়ামের Z-এর পরিমাণ অনেক কম এজন্য এক্ষেত্রে আলফাকণাগুলি কেন্দ্রীনের আরও নিকটতর দূরত্বে আসতে পারে। পরীক্ষা পদ্ধতি একই রকম, বিভিন্ন বিক্ষুরণ কোণের জন্য $N/\text{cosec}^4\,\theta/2$ রাশিটি পরিমাপ করা হয় এবং এটি ধ্রুব পরিমাণের কিনা তা বিচার করা হয়, তাথেকেই কুলম্ব বলের দ্বারা বিক্ষুরণ ঘটছে কিনা বোঝা যায়। দেখা যায় যে কুলম্ব ব্যস্ত বর্গের সূত্র (inverse square law) অ্যালুমিনিয়ামের ক্ষেত্রে $6\sim8\times10^{-13}$ সেমি ন্যূনতম অগ্রসর দূরত্বে এসে ভেঙ্গে পড়ে, অন্যান্য হালকা মৌলের ক্ষেত্রেও অনুরূপ সিদ্ধান্ত করা সম্ভব হ'ল। পরীক্ষার ফলাফল বিচার করে দেখান যায় যে, ঐসব ক্ষেত্রে কেন্দ্রীনের

অতি নিকটে আসলে কেন্দ্রীন ও আলফাকণার মধ্যে বিকর্ষণ কুলম্ব-সূত্র অনুযায়ী যা হওয়া উচিত তার তুলনায় অনেক কম হয়। এথেকেই সর্বপ্রথম কেন্দ্রীনের অবৈদ্যুতিক আকর্ষী বলসমূহের অস্তিত্বের সন্ধান পাওয়া যায়।

পরমাণুর আলোক বিকিরণ

প্রত্যেক পরমাণুই বহিঃশক্তির প্রভাবে উত্তেজিত হয়ে বিভিন্ন প্রকারের তড়িৎচুম্বকীয় তরঙ্গশক্তি বিকিরণ ক'রে থাকে, যেমন পদার্থকে অত্যধিক তাপমাত্রায় উত্তপ্ত করলে তার প্রভাবে পরমাণুগুলি উত্তেজিত হয়ে আলো অথবা তাপ বিকিরণ করে। এই উত্তেজন প্রক্রিয়া আরও নানাভাবে ঘটতে পারে, পরমাণুগুলি পারস্পরিক সংঘর্ষের দ্বারা উত্তেজিত হয়ে উঠতে পারে অথবা পদার্থের ভিতর দিয়ে বিদ্যুৎপ্রবাহ বইতে থাকলে ঐ প্রবাহমধ্যস্থ ইলেকট্রনের আঘাতের দ্বারাও এদের উত্তেজনা ঘটতে পারে। গ্যাসের ভিতর বিদ্যুৎমোক্ষণের দ্বারা কিভাবে আলো উৎপন্ন করা যায় সে সম্বন্ধে আগেই বলা হয়েছে। এই ধরণের বিকিরণে পরমাণু-কেন্দ্রীন কোন অংশ গ্রহণ করে না, শুধু বহিঃস্থ ইলেকট্রনগুলির উত্তেজনার ফলেই এই বিকিরণ ঘটে থাকে। উত্তেজিত পরমাণুর বিকিরণ সম্বন্ধে আমরা পরবর্তী পরিচ্ছেদগুলিতে আলোচনা করব কিন্তু তার আগে পরীক্ষাগারে বিভিন্ন ধরণের বিকিরণ কিভাবে অনুশীলন করা হয় সে সম্বন্ধে কিছু বলা প্রয়োজন।

বিভিন্ন ধরণের বিকিরণের মধ্যে দৃশ্য আলোর তরঙ্গদৈর্ঘ্য নির্ণয় করাই অপেক্ষাকৃত সহজ এবং দীর্ঘদিন থেকেই এই বিষয়ে বহু পরীক্ষা হয়ে আসছে। দৃশ্য আলোর ক্ষেত্রে ব্যতিচার জালি ব্যবহার ক'রে তরঙ্গদৈর্ঘ্যের শুদ্ধ পরিমাপ করা সম্ভব। কিন্তু জালির বিশ্লিষ্টকরণ ক্ষমতা অপেক্ষাকৃত কম এজন্য অত্যধিক বিশ্লিষ্টকরণের প্রয়োজন ঘটলে মাইকেলসন অথবা ফ্যাব্রি-পেরো ব্যতিচার যন্ত্র প্রয়োগ করা হয় যাদের বিশ্লিষ্টকরণ ক্ষমতা সাধারণ জালির তুলনায় অনেক বেশী। বেগুনীপারের রশ্মির জন্য কাঁচের আতস বা আয়না ব্যবহার করা সম্ভব নয় কারণ কাঁচ ঐ রশ্মিগুলিকে শোষণ করে, ঐসব ক্ষেত্রে কোয়ার্টজ পাথরের তৈরী প্রিজম ও আতসের ব্যবহার প্রচলিত। 1800A°-এর কম তরঙ্গদৈর্ঘ্য হলে বায়ু ঐ রশ্মিগুলি শোষণ করতে থাকে এবং কোয়ার্টজও ঐ রশ্মির কাছে অস্বচ্ছ হয়ে পড়ে। তাছাড়া ফোটোগ্রাফীর প্লেটে যে জিলেটিন থাকে তাও এই রশ্মিগুলি শোষণ করে এজন্য এদের বর্ণালীর ছবি তোলা সহজ নয়। এসব ক্ষেত্রে ফ্লুরাইট প্রিজম ও আতসের ব্যবহার করা হয় যা প্রায় 1050A° পর্যন্ত স্বচ্ছ থাকে এবং সমস্ত পরীক্ষার আয়োজনটি শূন্যের ভিতর রাখা হয় যাতে রশ্মিগুলি শোষিত হতে না পারে। ফোটোগ্রাফীর প্লেটের বদলে এই

তরঙ্গদৈর্ঘ্য অঞ্চলে আলোকবিদ্যুৎপ্রক্রিয়া চালিত বিশেষ ধরণের আলোকসচেতন ইলেকট্রনিক আয়োজনের সাহায্যে বর্ণালীর প্রকৃতি নিরূপণ করা হয়। আরও ছোট তরঙ্গদৈর্ঘ্যের জন্য বাঁকান ধাতুর জালি ব্যবহার করা হয়। একটি উত্তান (concave) আকৃতির তীব্র প্রতিবিম্বনশীল ধাতুর পাতের উপর খাঁজ কেটে জালি তৈরী করা হয়। উত্তান আকৃতি হওয়ার দরুণ জালিটি স্বয়ং বিভিন্ন তরঙ্গদৈর্ঘ্যের রশ্মিগুলিকে ফোকাস করতে পারে এজন্য এক্ষেত্রে কোন আতস ব্যবহারের প্রয়োজন হয় না। তবে সাধারণতঃ জালিপ্রসার ঐ তরঙ্গদৈর্ঘ্যগুলির তুলনায় অনেক বড় থাকে, রশ্মিগুলিকে এজন্য জালির উপর খুব অল্প কোণে আপাতিত করা হয় যার ফলে ক্রিয়াশীল জালিপ্রসারের পরিমাণ হ্রাস পায় এবং ব্যতিচার ক্রিয়া পর্য্যবেক্ষণ করা সম্ভব হয়। এই পদ্ধতিতে রঞ্জনরশ্মির ব্যতিচার ক্রিয়াও লক্ষ্য করা যায় এবং এর দ্বারা খুবই নির্ভুলভাবে রঞ্জনরশ্মির তরঙ্গদৈর্ঘ্য নির্ণয় করা সম্ভব।

দৃশ্য আলোর তুলনায় বৃহত্তর তরঙ্গদৈর্ঘ্যের জন্য দৃশ্য আলোর মতই কাঁচ-নির্মিত যন্ত্র ব্যবহার করা সম্ভব, যদিও এক্ষেত্রে এমন ফোটোগ্রাফীর প্লেট ব্যবহার করতে হবে যা অবলোহিত রশ্মি-সচেতন। এক্ষেত্রে জালিপ্রসারের পরিমাণও অপেক্ষাকৃত বেশী হওয়া প্রয়োজন। এইভাবে প্রায় 11,000A° পর্য্যন্ত তরঙ্গদৈর্ঘ্য মাপা সম্ভব হয়েছে। তরঙ্গদৈর্ঘ্যের পরিমাণ আরও বড় হলে, যেমন 10^{-4} সেমি থেকে 6×10^{-4} সেমি তরঙ্গদৈর্ঘ্যবিশিষ্ট অবলোহিত আলোর জন্য ফোটোগ্রাফীর প্লেটের ব্যবহার আর সম্ভব নয়। তখন বিশেষ ধরণের অবলোহিত আলোক-সচেতন পদার্থের পর্দা ব্যবহার করা হয়। লেড সালফাইড, ইণ্ডিয়াম অ্যান্টিমোনাইড প্রভৃতি পদার্থ এই কাজে ব্যবহৃত হয়েছে এবং এভাবে 4×10^{-3} সেমি পর্য্যন্ত তরঙ্গদৈর্ঘ্য মাপা সম্ভব হয়েছে। এর উপরেও যেসব তরঙ্গদৈর্ঘ্য আছে, যেমন 1 মিলিমিটার থেকে 1 মিটার পর্য্যন্ত তরঙ্গদৈর্ঘ্য, এদের জন্য সম্পূর্ণ তড়িৎচুম্বকীয় পরিমাপ-পদ্ধতির ব্যবহার প্রচলিত।

হাইড্রোজেন হ'ল পর্য্যায় সারণীর প্রথম মৌল, একটি প্রোটন কেন্দ্রীন এবং একটি বহিঃস্থ ইলেকট্রন, এই নিয়ে হাইড্রোজেন পরমাণু গঠিত। এই কারণে আশা করা যায় যে হাইড্রোজেনের বর্ণালী অন্যান্য মৌলের বর্ণালীর তুলনায় অপেক্ষাকৃত সরল হবে। বহুদিন পূর্বেই বিজ্ঞানী বামার হাইড্রোজেন বর্ণালীর দৃশ্য রেখাগুলির তরঙ্গদৈর্ঘ্য মাপেন এবং লক্ষ্য করেন যে এই তরঙ্গদৈর্ঘ্যগুলিকে একটি সহজ সূত্রের দ্বারা প্রকাশ করা যায়। হাইড্রোজেন বর্ণালীর যে সমস্ত রেখাগুলি এই সূত্র মেনে চলে তাদের একত্রে বলা হয় বামার শ্রেণী, এই শ্রেণীর অধিকাংশ রেখাই দৃশ্যসীমার অবস্থিত। যে রেখার শ্রেণীটি শুরু হয়েছে তার

তরঙ্গদৈর্ঘ্যে সবচেয়ে বেশী, তারপর তা ক্রমশঃ হ্রাস পেতে থাকে এবং রেখাগুলিও ক্রমশঃ পরস্পরের সন্নিহিত হয়ে আসতে থাকে, এদের তীব্রতাও হ্রাস পেতে থাকে এবং শেষ পর্যন্ত 3646×10^{-8} সেমি তরঙ্গদৈর্ঘ্যে এসে এই শ্রেণীটি শেষ হয়ে যায়। 4·5 চিত্রে বর্ণালী মাপনীর ভিতর শ্রেণীটি কিভাবে আবির্ভূত হয় তা দেখান হয়েছে। হাইড্রোজেনের বামার শ্রেণীর রেখাগুলির জন্য বামার যে সূত্রটি দেন তা হ'ল এই

$$\text{বামার (Balmer) শ্রেণী ঃ} \quad \frac{1}{\lambda} = R\left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2}\right),\ n = 3, 4, 5, \cdots$$

এখানে λ, শ্রেণীটির অন্তর্ভুক্ত কোন একটি রেখার তরঙ্গদৈর্ঘ্য বোঝায়। বিভিন্ন n-এর জন্য আমরা এক একটি ক'রে রেখা পাই ; এখানে R একটি ধ্রুবক, একে বলা হয় রিডবার্গ ধ্রুবক। এর আধুনিক পরীক্ষালব্ধ পরিমাণ হ'ল

$$R = 109677{\cdot}576 \pm {\cdot}012 \text{ সেমি}^{-1}$$

বামার সূত্রে $n = 3, 4, 5, \cdots$ ইত্যাদি বসিয়ে আমরা যথাক্রমে বামার শ্রেণীর প্রথম, দ্বিতীয়, তৃতীয় ইত্যাদি রেখাগুলির তরঙ্গদৈর্ঘ্য পাই। পরীক্ষার সাহায্যে মাপা তরঙ্গদৈর্ঘ্যের সঙ্গে এই সূত্রের ফলাফল খুব চমৎকার মিলে যায়। বামার শ্রেণীতে আছে হাইড্রোজেন বর্ণালীর দৃশ্য অংশের সমস্ত রেখাগুলি এবং বেগুনীপার অঞ্চলের কিছু রেখা। এই বর্ণালীর বেগুনীপার ও অবলোহিত অংশ পরীক্ষা ক'রে এরকম আরও চারটি শ্রেণীর সন্ধান পাওয়া গেছে। এই শ্রেণীগুলির জন্যও বামার সূত্রের অনুরূপ এক একটি সূত্র আছে যাদের দ্বারা এদের অভ্যন্তরস্থ প্রতিটি রেখার তরঙ্গদৈর্ঘ্য প্রকাশ করা চলে। চারজন বিভিন্ন গবেষকের নামানুযায়ী এই চারটি শ্রেণীর নামকরণ করা হয়েছে, যেমন বেগুনীপার অঞ্চলের লাইমান শ্রেণী

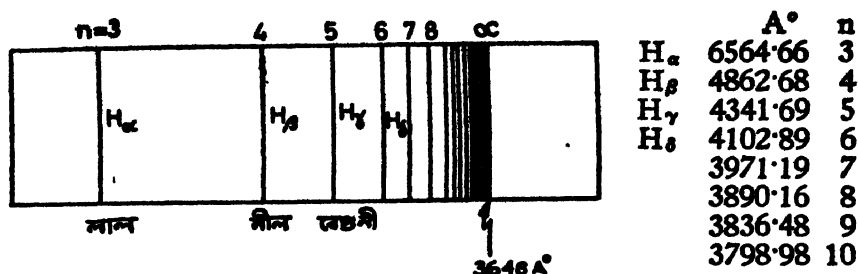
$$\text{লাইমান (Lyman) শ্রেণী ঃ} \quad \frac{1}{\lambda} = R\left(\frac{1}{1^2} - \frac{1}{n^2}\right),\ n = 2, 3, 4, \cdots$$

এবং অবলোহিত অঞ্চলের মোট তিনটি শ্রেণী—

$$\text{প্যাশেন (Pashen) শ্রেণী ঃ} \quad \frac{1}{\lambda} = R\left(\frac{1}{3^2} - \frac{1}{n^2}\right),\ n = 4, 5, 6, \cdots$$

$$\text{ব্র্যাকেট (Brackett) শ্রেণী ঃ} \quad \frac{1}{\lambda} = R\left(\frac{1}{4^2} - \frac{1}{n^2}\right),\ n = 5, 6, 7, \cdots$$

$$\text{ফাণ্ড (Pfund) শ্রেণী ঃ} \quad \frac{1}{\lambda} = R\left(\frac{1}{5^2} - \frac{1}{n^2}\right),\ n = 6, 7, 8, \cdots$$

বর্ণালীর যে প্রত্যেকটি শ্রেণীই একই ধরণের সূত্রের দ্বারা প্রকাশিত এবং প্রত্যেকটি সূত্রেই একই রিডবার্গ ধ্রুবকের আবির্ভাব ঘটছে। প্রত্যেকটি শ্রেণীরই

চিত্র 4·5

বামার শ্রেণীর রেখাসমূহ এবং প্রথম আটটি রেখার তরঙ্গদৈর্ঘ্য। পাশাপাশি বামার সূত্র প্রদত্ত *n*-এর পরিমাণগুলি লেখা হয়েছে।

বামার শ্রেণীর সঙ্গে সাদৃশ্য আছে অর্থাৎ *n*-এর সংখ্যা যত বৃদ্ধি পেতে থাকে ততই রেখাগুলির তীব্রতা কমতে থাকে এবং এরা পরস্পর ক্রমশঃ সন্নিহিত হয়ে আসে। শ্রেণীটি শেষ হয় যখন $n \to \infty$, এবং যে তরঙ্গদৈর্ঘ্যে এসে এটি শেষ হয় তার পরিমাণ উপরোক্ত সূত্রগুলি থেকে সহজেই গণনা করা যায়। উদাহরণস্বরূপ, যখন $n \to \infty$ তখন লাইমান শ্রেণীর জন্য আমরা পাই

$$\lambda_{\infty} = \frac{1}{R} = 911\text{A}^{\circ}$$

এই তরঙ্গটি সুদূর বেগুনীপার (far ultraviolet) অঞ্চলে অবস্থিত। সমগ্র লাইমান শ্রেণীটিও সম্পূর্ণ বেগুনীপার অঞ্চলে অবস্থিত।

উপরোক্ত সূত্রগুলি সমস্তই পরীক্ষালব্ধ কিন্তু প্রতিটি সূত্রই নির্ভুলভাবে হাইড্রোজেন বর্ণালীর রেখাগুলির তরঙ্গদৈর্ঘ্য প্রকাশ করে। এটা সহজেই অনুমেয় যে যেকোন তত্ত্ব যা হাইড্রোজেন বর্ণালীর প্রকৃতি নির্দ্ধারণ করতে সক্ষম হবে, তাথেকে পরিশেষে এই সূত্রগুলি উদ্ধার করা সম্ভব হবে। যিনি প্রথম তাত্ত্বিক উপায়ে এই সূত্রগুলি ব্যাখ্যা করতে সক্ষম হন তিনি হলেন বিজ্ঞানী নিলস্ বোর (Bohr), ইনি রাদারফোর্ডের পরমাণু গঠনকল্প ও প্ল্যাঙ্কের কোয়াণ্টাম তত্ত্বের সমন্বয় সাধন ক'রে সর্ব্বপ্রথম হাইড্রোজেন বর্ণালীর একটি সাফল্যমণ্ডিত তাত্ত্বিক গঠনকল্প প্রদান করতে সক্ষম হন।

হাইড্রোজেন বর্ণালী ঃ বোর তত্ত্ব

রাদারফোর্ডের পরীক্ষা থেকে জানা গেল যে পরমাণুর অভ্যন্তরে একটি ক্ষুদ্র কেন্দ্রীনের অস্তিত্ব আছে যার ভিতর পরমাণুর সমস্ত ধন-আধান

কেন্দ্রীভূত, এছাড়া পরমাণুর ভিতর অধিকাংশ স্থানই শূন্য এবং এই শূন্যের মধ্যে থেকে ইলেকট্রনগুলি কেন্দ্রীনের চারপাশে আবর্তন করে। কিন্তু পরমাণুর এই গঠনকল্পের কতগুলি দুর্বলতা আছে। ম্যাকসওয়েলের তাড়িৎচুম্বকীয় তত্ত্ব অনুসারে যখনই কোন বৈদ্যুতিক আধানের ত্বরণ হয় তখনই তা তাড়িৎ-চুম্বকীয় শক্তি বিকিরণ করবে। সুতরাং পরমাণুর ভিতর ইলেকট্রনগুলি কেন্দ্রীনের চারপাশে আবর্তিত হতে থাকলে কেন্দ্রীনের অভিমুখে এদের যে ত্বরণ থাকবে তার ফলে এই ইলেকট্রনগুলি ক্রমাগত শক্তি বিকিরণ ক'রে চলবে। এইভাবে বিকিরণ ঘটার দরুণ শক্তিক্ষয় হতে থাকলে ইলেকট্রন কক্ষপথের ব্যাসার্দ্ধও ক্রমশঃ হ্রাস পাবে এবং অবশেষে একসময় এগুলি কেন্দ্রীনের উপর নেমে আসবে। রাদারফোর্ড প্রস্তাবিত গঠনকল্পকে সনাতন পদার্থবিজ্ঞান অনুযায়ী বিচার করতে গেলে এই সমস্যার সম্মুখীন হতে হয়, এই জটিলতাকে অতিক্রম করার জন্য বোর একটি সাহসিক দৃষ্টিভঙ্গী গ্রহণ করলেন। তিনি প্রস্তাব করলেন যে, একটি ইলেকট্রন কেন্দ্রীনের চারপাশে একটি বৃত্তাকার কক্ষপথে আবর্তিত হয়, তবে এই আবর্তনজনিত ত্বরণের ফলে এটি কোন বিদ্যুৎচুম্বকীয় শক্তি বিকিরণ করে না। ইলেকট্রনের কক্ষপথ নির্দ্দিষ্ট এবং ঐ কক্ষপথে আবর্তনকালে এর নির্দ্দিষ্ট শক্তি থাকে এবং বাইরে থেকে কোন প্রতিক্রিয়া না হলে এটি চিরকালই একই শক্তি নিয়ে ঐ কক্ষপথে পরিভ্রমণ করতে থাকবে। অবশ্য বহিঃস্থ শক্তির প্রয়োগের দ্বারা কোন একটি কক্ষের ইলেকট্রনকে উত্তেজিত করা সম্ভব, এই উত্তেজনার ফলে একটি ইলেকট্রন অপেক্ষাকৃত স্বল্প শক্তিবিশিষ্ট একটি কক্ষ থেকে অপেক্ষাকৃত অধিক শক্তিসমন্বিত অপর একটি কক্ষে চলে আসতে পারে, এই প্রক্রিয়ার পরমাণুটি বহিঃস্থ কোন উৎস থেকে ঐ অতিরিক্ত পরিমাণ শক্তি শোষণ করে। আবার এর বিপরীত প্রক্রিয়াও ঘটতে পারে অর্থাৎ একটি উত্তেজিত পরমাণুর ভিতর একটি ইলেকট্রন কোন অধিক শক্তিসমন্বিত কক্ষ থেকে একটি স্বল্পতর শক্তিসমন্বিত কক্ষে চলে আসতে পারে, তখন অতিরিক্ত শক্তি বিদ্যুৎচুম্বকীয় শক্তি হিসাবে বিকিরিত হয়ে যায়। বোরের প্রকল্প অনুসারে শোষণ বা বিকিরণ উভয় ক্ষেত্রেই প্রক্রিয়াটি নিম্নলিখিতরূপে প্রকাশ করা চলে

$$E_2 - E_1 = h\nu \qquad \cdots \qquad \cdots \qquad 4{\cdot}14$$

এখানে ν হল শোষিত বা বিকিরিত তাড়িৎচুম্বকীয় বিকিরণের স্পন্দনাঙ্ক এবং E_1, E_2 যথাক্রমে দুটি ভিন্ন কক্ষপথে ইলেকট্রনের মোট শক্তির পরিমাণ। বিকিরণ সম্বন্ধে এই সিদ্ধান্তটি প্ল্যাঙ্কের কোয়ান্টাম প্রকল্প ছাড়া আর কিছুই নয়, কিন্তু ধ্রুব শক্তিতে নির্দ্দিষ্ট কক্ষপথে আবর্তনের প্রকল্পটি

ম্যাক্সওয়েলের তড়িৎচুম্বকীয় বিকিরণ তত্ত্বের সম্পূর্ণ পরিপন্থী, এটি বোরের নিজস্ব অবদান।

হাইড্রোজেন পরমাণুতে কোন একটি কক্ষের ভিতর আবর্ত্তনশীল অবস্থায় ইলেকট্রনের একটি নির্দিষ্ট পরিমাণের কৌণিক ভরবেগ থাকে। বোরের দ্বিতীয় প্রকল্প হ'ল যে, এই কক্ষীয় কৌণিক ভরবেগ শুধু কতগুলি নির্দিষ্ট কোয়াণ্টাম পরিমাণের হতে পারে, এই পরিমাণগুলি নিম্নলিখিত সর্ত্তের দ্বারা প্রকাশিত

$$mvr = n\hbar,\ n = 1, 2, 3, \cdots \qquad \cdots \qquad 4{\cdot}15$$

এখানে v ইলেকট্রনটির গতিবেগ এবং r কেন্দ্রীন থেকে এর দূরত্ব। কক্ষীয় ইলেকট্রনগুলির শুধু কতগুলি কোয়াণ্টাম পরিমাণের কৌণিক ভরবেগ থাকতে পারে এই প্রকল্পটি প্ল্যাঙ্কের কোয়াণ্টাম প্রকল্পের সঙ্গে সামঞ্জস্যপূর্ণ, কারণ $\hbar$ এবং কৌণিক ভরবেগের মাত্রা অভিন্ন। $n = 1, 2, 3, \cdots$ যথাক্রমে প্রথম, দ্বিতীয়, তৃতীয়, ইত্যাদি বৃত্তাকার ইলেকট্রন কক্ষগুলিকে নির্দেশ করে। এই সর্ত্তটি ব্যবহার ক'রে কোন একটি কক্ষে ইলেকট্রনের মোট শক্তি গণনা করলে দেখা যায় যে, এই শক্তিও শুধু কতগুলি কোয়াণ্টাম পরিমাণের হতে পারে। প্ল্যাঙ্কের সূত্রের মত উপরিলিখিত 4·15 সর্ত্তটিও পরমাণুর গঠন ও প্রকৃতি নির্দ্ধারণের ক্ষেত্রে একটি যুগান্তকারী আবিষ্কার। 4·14 ও 4·15 সর্ত্তদ্বয় হ'ল বোর তত্ত্বের ভিত্তি, এগুলি ব্যবহার ক'রে হাইড্রোজেন বর্ণালীর রেখাগুলি কিভাবে উৎপন্ন হয় তার একটি সহজ ব্যাখ্যা দেওয়া যায়।

হাইড্রোজেন পরমাণুর কক্ষপথে পরিভ্রমণশীল ইলেকট্রনের শক্তি নিম্নলিখিত উপায়ে গণনা করা যায় ঃ ইলেকট্রনের উপর কেন্দ্রাতিগ বলের পরিমাণ হবে

$$F = \frac{mv^2}{}$$

যে বিপরীতমুখী বল এই বলকে রোধ করছে তা হ'ল কেন্দ্রীন ও ইলেকট্রনের ভিতর বৈদ্যুতিক আকর্ষণ। সর্ব্বজনীনতা বজায় রাখার জন্য আমরা এমন একটি কেন্দ্রীন নিয়ে আরম্ভ করি যার মোট ধন-আধানের পরিমাণ Ze, Z একটি অখণ্ড সংখ্যা। যখন $Z = 1$, তখন আমরা হাইড্রোজেনের ফলাফল পাব। এই Ze আধানবিশিষ্ট কেন্দ্রীনের চারপাশে ধরা যাক একটিমাত্র ইলেকট্রন আবর্ত্তিত হচ্ছে, এর উপর কেন্দ্রীনের আকর্ষণের পরিমাণ হয়

$$F = \frac{Ze^2}{}$$

এই বলদ্বয় পরস্পর সমান ধরলে আমরা পাই

$$v=\frac{\sqrt{Z}e}{\sqrt{mr}} \qquad \cdots \qquad 4{\cdot}16$$

একটি আবর্তনশীল ইলেকট্রনের মোট শক্তি এর বিভবশক্তি ও গতিশক্তির যোগফল

$$E=\frac{1}{2}mv^2-\frac{Ze^2}{r}=-\frac{Ze^2}{2r} \qquad \cdots \qquad 4{\cdot}17$$

আবার 4·15 ও 4·16 সম্বন্ধদ্বয় ব্যবহার করলে আমরা পাই

$$\frac{nh}{mr}=\frac{\sqrt{Z}e}{\sqrt{mr}}$$

এবং এথেকে

$$r=\frac{n^2h^2}{Ze^2m}$$

r-এর এই মান 4·17 সম্বন্ধটিতে প্রয়োগ করলে এবার আমরা পাই

$$E_n=-\frac{Z^2e^4m}{2n^2h^2}, \quad n=1, 2, 3,\cdots \qquad \cdots \qquad 4{\cdot}18$$

স্বাভাবিকভাবেই E-এর পরিমাণ নির্ভর করবে n-এর উপর, অর্থাৎ কক্ষটি কোন কৌণিক ভরবেগ অবস্থায় আছে তার উপর। এভাবে n-এর প্রত্যেক পরিমাণের জন্য আমরা পরমাণুর ভিতর অবস্থিত ইলেকট্রনের একটি শক্তিস্তর পাই, এক একটি স্বতন্ত্র শক্তিস্তর এক একটি স্বতন্ত্র কক্ষকে নির্দেশ করে। লক্ষ্য করতে হবে যে শক্তির পরিমাণগুলি সমস্তই ঋণরাশি ; এর অর্থ হ'ল, পরমাণুর ভিতর থেকে বেরিয়ে আসার মত শক্তি ইলেকট্রনের থাকে না। এরকম অবস্থাকে বলা হয় পরমাণুর ভিতর ইলেকট্রনের আবদ্ধ অবস্থা। n-কে বলা হয় একটি কোয়াণ্টাম সংখ্যা এবং সবচেয়ে কম শক্তিবিশিষ্ট কক্ষপথের কোয়াণ্টাম সংখ্যা হল $n=1$, এই শক্তিস্তরটিকে বলা হয় পরমাণুর ভূমিস্তর (ground state)। এর পরের E_2, E_3, E_4, ইত্যাদি উচ্চতর শক্তিবিশিষ্ট স্তরগুলিকে বলা হয় পরমাণুর উত্তেজিত শক্তিস্তর, কিন্তু প্রত্যেক ক্ষেত্রেই E_n একটি ঋণরাশি। 4·18 সূত্র থেকে লক্ষ্য করা যায় যে, যতই n-এর পরিমাণ বৃদ্ধি পেতে থাকে E_n-এর পরিমাণ ততই শূন্যের দিকে অগ্রসর হতে থাকে, অর্থাৎ যখন $n \rightarrow \infty$, $E \rightarrow 0$। $E=0$ বলতে বোঝায় ঐ অবস্থায় ইলেকট্রনটির বন্ধনশক্তির পরিমাণ শূন্য, তখন ইলেকট্রনটি আর পরমাণুর ভিতর আবদ্ধ নয় এবং বন্ধনমুক্ত হয়ে এটি স্বাধীনভাবে চলাফেরা করতে পারে।

এখন দেখা যাক বোর তত্ত্ব থেকে হাইড্রোজেন পরমাণুর গঠন ও বিকিরণ সম্বন্ধে কি জ্ঞানলাভ করা সম্ভব। আমাদের প্রথম বিচার্য্য হবে পরীক্ষালব্ধ হাইড্রোজেন বর্ণালী উপরোক্ত সূত্রগুলির সাহায্যে ব্যাখ্যা করা যায় কিনা। হাইড্রোজেন পরমাণুর ভিতর ইলেকট্রনটি স্বাভাবিক অবস্থায় ভূমিস্তরে থাকে, কিন্তু বহিঃশক্তির প্রভাবে সহজেই একে উত্তেজিত করা যায়। হাইড্রোজেন গ্যাসের ভিতর বিদ্যুৎমোক্ষণ ঘটালে অন্ততঃ কিছুসংখ্যক পরমাণুর ভিতর ইলেকট্রনগুলি ভূমিস্তর থেকে অধিক শক্তিসম্পন্ন কোন শক্তিস্তরে উঠে আসবে। ধরা যাক, হাইড্রোজেন পরমাণুর দুই শক্তিস্তরে মোট শক্তির পরিমাণ যথাক্রমে E_i এবং E_f ; যেহেতু হাইড্রোজেনের ক্ষেত্রে $Z=1$, আমরা লিখতে পারি

$$E_i = -\frac{e^4 m}{2n_i^2 \hbar^2}.$$

$$E_f = -\frac{e^4 m}{2n_f^2 \hbar^2}$$

$$E_i - E_f = \frac{e^4 m}{2\hbar^2}\left[\frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2}\right] \qquad 4{\cdot}19$$

যদি $n_i > n_f$ হয় তবে $E_i > E_f$, সুতরাং উচ্চ শক্তিবিশিষ্ট স্তর থেকে স্বল্পতর শক্তিবিশিষ্ট স্তরে নেমে আসার ফলে $E_i - E_f$ পরিমাণ শক্তি তড়িৎচুম্বকীয় তরঙ্গ হিসাবে বিকিরিত হবে। এবার 4·14 সর্ত্তটি প্রয়োগ করে আমরা পাই

$$2\pi\hbar\nu = \frac{e^4 m}{2\hbar^2}\left[\frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2}\right]$$

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{e^4 m}{4\pi\hbar^3 c}\left[\frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2}\right] \qquad 4{\cdot}20$$

4·20 সূত্রটি হ'ল বোর তত্ত্ব অনুযায়ী হাইড্রোজেন পরমাণুর আলোক বিকিরণের মূল সূত্র, লক্ষণীয় যে এই সূত্রে বর্ত্তনীর বাইরে যে রাশিগুলি আছে তাদের প্রত্যেকটিই ধ্রুবক, এজন্য এই সূত্রের গঠন ঠিক বামার সূত্রেরই মত। এই সূত্র অনুযায়ী যেভাবে হাইড্রোজেন বর্ণালী সৃষ্টি হয় তা 4·6 চিত্রের দ্বারা বোঝান যায়। এখানে অধিক শক্তিবিশিষ্ট স্তরগুলি বড় বৃত্ত হিসাবে এবং স্বল্পতর শক্তিবিশিষ্ট স্তরগুলি ছোট বৃত্ত হিসাবে দেখান হয়েছে। এর কারণ আমরা 4·17 সূত্র থেকে দেখি যে কক্ষস্থ ইলেকট্রনের শক্তি কক্ষের ব্যাসার্দ্ধের সাথে সাথে বৃদ্ধি পেতে থাকে। ইলেকট্রনের পরাবর্ত্তন, অর্থাৎ একটি অধিক

ব্যাসার্ধের কক্ষ থেকে অপেক্ষাকৃত অল্প ব্যাসার্ধের একটি কক্ষে প্রত্যাবর্তনকে তীরচিহ্নিত সরলরেখার সাহায্যে বোঝান হয়েছে। প্রত্যেকটি কক্ষের n-এর পরিমাণ নির্দিষ্ট, $n=1, 2, 3 \cdots$ ইত্যাদি মানের জন্য যথাক্রমে প্রথম, দ্বিতীয়, তৃতীয় ইত্যাদি বৃত্তগুলি আঁকা হয়েছে।

চিত্র 4·6

বোর তত্ত্ব অনুসারে হাইড্রোজেন বর্ণালীর বিভিন্ন শ্রেণীগুলি কিভাবে উৎপন্ন হয় তার একটি ছক। বিভিন্ন পরাবর্তনগুলি তীরচিহ্নিত রেখার সাহায্যে বোঝান হয়েছে।

কোন উত্তেজিত শক্তিস্তর থেকে $n=1$ স্তরে, অর্থাৎ ভূমিস্তরে ইলেকট্রনের প্রত্যাবর্তনের ফলে যে সমস্ত বিকিরণের সৃষ্টি হয় তাদের তরঙ্গদৈর্ঘ্যের জন্য 4·20 সূত্রটি নিম্নলিখিত রূপ নেয়

$$\frac{1}{\lambda}=\frac{e^4 m}{4\pi\hbar^3 c}\left[\frac{1}{1^2}-\frac{1}{n^2}\right],\ n=2, 3, 4, \cdots \qquad \cdots \qquad 4{\cdot}21$$

এবং সূত্রটি ঠিক লাইমান সূত্রের মত। সূত্রটি অবিকল লাইমান শ্রেণীর সূত্র হবে যদি $\frac{e^4 m}{4\pi\hbar^3 c}$ এই ধ্রুব রাশিটির মান রিডবার্গ ধ্রুবক R-এর সমান হয়। পরিশিষ্টের একটি তালিকায় e, m এবং h এর পরিমাণ দেওয়া হয়েছে, এগুলি প্রয়োগ করলে দেখা যায় যে এই রাশিটির মান পরীক্ষালব্ধ রিডবার্গ ধ্রুবকের মানের সমান †

$$R=\frac{e^4 m}{4\pi\hbar^3 c}=1{\cdot}0968\times10^5 \text{ সেমি}^{-1} \qquad 4{\cdot}22$$

† 4·24 সমীকরণ দ্রষ্টব্য

সুতরাং বোর তত্ত্ব থেকে প্রাপ্ত শ্রেণী এবং পরীক্ষালব্ধ লাইম্যান শ্রেণী পরস্পর অভিন্ন। 4·21 সূত্রে $n_f = 2$ বসালে আমরা বামার শ্রেণীটি পাই

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{e^4 m}{4\pi \hbar^3 c}\left[\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2}\right], n = 3, 4, 5, \cdots \quad \cdots \quad 4{\cdot}23$$

$n_f = 3, 4, 5$ বসালে যথাক্রমে প্যাশেন, ব্র্যাকেট ও ফাণ্ড্ শ্রেণীর সূত্রগুলি উদ্ধার করা যায়। এইভাবে বোর তত্ত্বের দ্বারা হাইড্রোজেনের পরীক্ষা-লব্ধ শ্রেণীগুলি সম্পূর্ণরূপে বিশ্লেষণ করা সম্ভব হয়। $1/\lambda$ রাশিটিকে বলা হয় তরঙ্গ-সংখ্যা, এটির একক হ'ল সেণ্টিমিটার$^{-1}$। এক সেণ্টিমিটার দৈর্ঘ্যের মধ্যে যতগুলি পূর্ণ তরঙ্গদৈর্ঘ্য থাকতে পারে এটি হ'ল সেই সংখ্যা।

বোর তত্ত্বের প্রয়োগ

বিকিরণের মত পরমাণুর আলোক শোষণ প্রক্রিয়াও বোর তত্ত্বের দ্বারা বিশ্লেষণ করা যায়, এক্ষেত্রে বহিরাগত একটি আলোককণা শোষণের ফলে, ইলেকট্রনটি সাধারণতঃ ভূমিস্তর থেকে একটি উত্তেজিত স্তরে চলে আসে। শোষিত আলোককণাটির শক্তি এমন হতে হবে যে তা যেন ঠিক স্তরদ্বয়ের ভিতর শক্তির ব্যবধানের সমান হয়। হাইড্রোজেনের ভিতর বিভিন্ন স্পন্দনাঙ্কের আলো নিক্ষেপ ক'রে দেখা যায় যে, কতগুলি বিশেষ বিশেষ স্পন্দনাঙ্কের জন্য শোষণের পরিমাণ অত্যধিক বৃদ্ধি পায়, ঐসব ক্ষেত্রে উপরিলিখিত সর্ত্তটি পালিত হয়। স্বাভাবিক অবস্থায় হাইড্রোজেন পরমাণুতে ইলেকট্রনটি ভূমিস্তরে থাকে, এজন্য শোষণ বর্ণালীতে শুধু লাইমান শ্রেণীই লক্ষ্য করা যায়।

উপরিলিখিত সূত্রগুলি হাইড্রোজেন পরমাণু বা এর সদৃশ অন্য যেকোন পরমাণু বা আয়ন যার ভিতর কেন্দ্রীনের চারপাশে একটি মাত্র ইলেকট্রন ঘুরছে, তাদের সবার ক্ষেত্রেই প্রযোজ্য। উদাহরণ হিসাবে হিলিয়াম আয়নের উল্লেখ করা যায়। হিলিয়াম পরমাণুর কেন্দ্রীনে আছে দুটি প্রোটনের সমান আধান এবং কক্ষে আছে দুটি ইলেকট্রন, হিলিয়াম পরমাণুর ভিতর থেকে একটি ইলেকট্রন বেরিয়ে গেলে তা হিলিয়াম আয়নে পরিণত হয়। একটিমাত্র কক্ষীয় ইলেকট্রনের অস্তিত্ব থাকার জন্য বর্ণালী সৃষ্টির ব্যাপারে হিলিয়াম আয়ন ঠিক হাইড্রোজেন পরমাণুর মতই ব্যবহার করে। হিলিয়াম আয়নের বর্ণালী পরীক্ষা ক'রে তাতে লাইমান, বামার ইত্যাদি প্রত্যেকটি শ্রেণীর অস্তিত্ব প্রমাণিত হয়েছে। তবে যেহেতু নির্গত বিকিরণের স্পন্দনাঙ্কের পরিমাণ Z^2-এর সমানুপাতী, এজন্য হিলিয়াম আয়নের ক্ষেত্রে বর্ণালীর রেখাগুলির তরঙ্গদৈর্ঘ্য হাইড্রোজেনের

ঐলফা রেখাগুলির তুলনায় চারগুণ ছোট হবে ; পরীক্ষার এই যুক্তির যথার্থতা প্রমাণিত হয়েছে।

বোর সূত্র থেকে আমরা দেখি যে নির্গত বিকিরণের তরঙ্গদৈর্ঘ্য শুধু ইলেকট্রনের ভরের উপর নির্ভর করে, কেন্দ্রীনের ভরের উপর এর কোন নির্ভরশীলতা নেই। কিন্তু আসলে এটা তখনই শুধু সত্য যখন কেন্দ্রীনের ভরের তুলনায় ইলেকট্রনের ভরকে সম্পূর্ণ অবহেলা করা যায়, কারণ আমরা 4·19 সূত্রটি পেতে কেন্দ্রীনকে সম্পূর্ণ স্থির ব'লে ধ'রে নিয়েছি। হাইড্রোজেন কেন্দ্রীনের ক্ষেত্রে তা অবশ্য প্রায় সত্য, কারণ প্রোটনের ভর ইলেকট্রনের তুলনায় 1836 গুণ বেশী, কিন্তু তাহলেও প্রোটনের ভরকে ইলেকট্রনের তুলনায় ঠিক অসীম ধরা যায় না এবং সসীম ভরের জন্য 4·22 সম্বন্ধের কিছু পরিবর্তন আবশ্যক। দেখান যায় যে, যদি প্রোটনের ভরকে অসীম না ধ'রে নির্দিষ্ট সসীম পরিমাণের ধরা হয় তবে রিডবার্গ ধ্রুবকের মান বদলে গিয়ে হবে

$$R_H = \frac{me^4}{4\pi h^3 c(1+m/M_p)} \qquad \cdots \quad 4{\cdot}24$$

এখানে M_p প্রোটনের ভর। অর্থাৎ এই ধ্রুবকের মান তখন ইলেকট্রন ও প্রোটনের ভরের অনুপাতের উপর নির্ভর করবে। পূর্বে (4·22 সম্বন্ধ) হাইড্রোজেনের রিডবার্গ ধ্রুবকের যে তাত্ত্বিক মান নির্দেশ করা হয়েছে তা 4·24 সমীকরণ থেকেই প্রাপ্ত। রিডবার্গ ধ্রুবকের এই নূতন প্রকাশনটিকে নিম্নলিখিত উপায়ে প্রমাণ করা যেতে পারে : যদি কণাদ্বয়ের ভর পরস্পরের সঙ্গে তুলনীয় হয় তবে তাদের আবর্তনের প্রকৃতি হবে একটু স্বতন্ত্র ধরণের, সেক্ষেত্রে কণাদুটির পরিপ্রেক্ষিতে কণাদুটি এই স্থির ভরকেন্দ্রের চতুর্দিকে আবর্তিত হতে থাকে, যেমন দেখান হয়েছে 4·7 চিত্রটিতে। অবশ্য ভরকেন্দ্রটির একটি নিজস্ব সরল গতি থাকতে পারে। ভরকেন্দ্রের সংজ্ঞা থেকে আমরা পাই

$$Mx_2 = mx_1$$

এক্ষেত্রে পরমাণুর ব্যাসার্ধের পরিমাণ হ'ল $r = x_1 + x_2$ এবং উপরের সর্তটির সহায়তায় x_1, x_2 রাশিদ্বয় নিম্নলিখিত উপায়ে প্রকাশ করা যায়

$$x_1 = \frac{Mr}{M+m}, \quad x_2 = \frac{mr}{M+m}$$

যেহেতু M ও m দুটি কণাই স্থির ভরকেন্দ্রের চতুর্দিকে আবর্তিত হচ্ছে, মোট কৌণিক ভরবেগ হবে কণাদ্বয়ের কৌণিক ভরবেগের যোগফলের সমান।

$$\text{কৌণিক ভরবেগ} = Mv_2x_2 + mv_1x_1 = Mx_2^2\omega + mx_1^2\omega$$
$$= \frac{Mm}{M+m} r^2\omega$$

এখানে ω উভয় কণার সাধারণ কৌণিক গতিবেগ। যদি লেখা যায়

$$\mu = \frac{Mm}{M+m}$$

M x_2 x_1

চিত্র 4·7

তাহলে বর্ত্তমান ক্ষেত্রে বোরের কোয়াণ্টাম সর্ত্তটি নিম্নলিখিত উপায়ে উপস্থাপিত করা যায়

$$\mu r^2\omega = n\hbar \quad \cdots \quad 4{\cdot}25$$

আবার যেহেতু এক্ষেত্রে ইলেকট্রনটি স্থির ভরকেন্দ্রের চতুষ্পার্শ্বে বৃত্তাকারে আবর্ত্তিত হচ্ছে, এর গতির জন্য আমরা নিম্নলিখিত সমীকরণটি লিখতে পারি

$$mx_1\omega^2 = \mu r\omega^2 = \frac{Ze^2}{r^2}$$

কেন্দ্রীনের সীমিত ভরের জন্য বিভবশক্তি নির্দ্দেশক রাশিটির কোন পরিবর্ত্তন হয় না, কণাদ্বয়ের উভয়ের মিলিত গতিশক্তির জন্য আমরা লিখতে পারি

$$(\tfrac{1}{2}mx_1^2 + \tfrac{1}{2}Mx_2^2)\omega^2 = \tfrac{1}{2}\frac{Mm}{M+m} r^2\omega^2$$
$$= \tfrac{1}{2}\mu r^2\omega^2 \doteq \tfrac{1}{2} Ze^2 \quad 4{\cdot}26$$

সুতরাং মোট শক্তির পরিমাণ

$$W_n = -\frac{Ze^2}{2r}$$

অর্থাৎ ঠিক পূর্ব্বের 4·18 সমীকরণেরই মত। সমীকরণ 4·25 ও 4·26 থেকে আমরা ব্যাসার্দ্ধ r-এর জন্য সমাধান করতে পারি

$$r = \frac{n^2\hbar^2}{\mu Ze^2} \quad 4{\cdot}27$$

সুতরাং

$$W_n = -\frac{Z^2 e^4 \mu}{2n^2 \hbar^2} \qquad \cdots \qquad 4{\cdot}28$$

অর্থাৎ 4·19 সূত্রটিতে m-কে μ দ্বারা পরিবর্তিত করলেই যথেষ্ট। সুতরাং এইভাবে আমরা 4·24 সম্বন্ধটিতে উপনীত হই। হাইড্রোজেন বর্ণালীর তরঙ্গদৈর্ঘ্যগুলি মেপে এবং এই সম্বন্ধটি প্রয়োগ ক'রে ইলেকট্রন ও প্রোটনের ভরের অনুপাত নির্ণয় করা যায়। এভাবে এই অনুপাতের বিশেষ নির্ভুল মান নির্ণয় করা সম্ভব এবং তা অপরাপর পদ্ধতির দ্বারা নির্দ্ধারিত পরিমাণের সঙ্গে সম্পূর্ণ সামঞ্জস্যপূর্ণ।

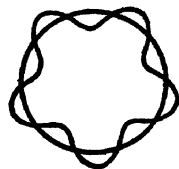
হাইড্রোজেনের একটি আইসোটোপ আছে যার নাম ডিউটেরিয়াম। একটি ডিউটেরিয়াম পরমাণুর ভর হাইড্রোজেনের পরমাণুর প্রায় দ্বিগুণ, কিন্তু এর কেন্দ্রীনের আধান প্রোটনের আধানের সমান, এর বর্ণালীও ঠিক হাইড্রোজেন বর্ণালীর মত। তবে যেহেতু ভর হাইড্রোজেনের দ্বিগুণ এজন্য 4·24 সূত্র অনুযায়ী রিডবার্গ ধ্রুবকের পরিমাণ এক্ষেত্রে সামান্য পৃথক, হাইড্রোজেনের তুলনায় তা সামান্য বেশী। সুতরাং ডিউটেরিয়াম বর্ণালীর রেখাগুলির তরঙ্গদৈর্ঘ্য হাইড্রোজেনের তুলনায় সামান্য ছোট হবে। এই প্রক্রিয়াটি শুধু কেন্দ্রীনের ভরের উপর নির্ভর করে ব'লে একে বলা হয় আইসোটোপীয় বিচ্যুতি। এই বিচ্যুতির পরিমাণ অবশ্য খুবই সামান্য, কিন্তু তাহলেও অত্যধিক বিশ্লিষ্টকরণ ক্ষমতাসম্পন্ন যন্ত্রের সাহায্যে পরীক্ষাগারে তা মাপা সম্ভব। মার্কিন বিজ্ঞানী ইউরে (Urey) হাইড্রোজেন গ্যাসের বর্ণালীতে তরঙ্গদৈর্ঘ্যের এই বিচ্যুতি লক্ষ্য ক'রে ডিউটেরিয়ামের অস্তিত্ব সর্ব্বপ্রথম প্রমাণ করেন।

বোর তত্ত্ব প্রয়োগ ক'রে হাইড্রোজেন পরমাণুর ব্যাসার্দ্ধ মাপা সম্ভব। 4·27 সূত্র থেকে r-এর পরিমাণ পাওয়া যায়। স্বাভাবিক অবস্থায় হাইড্রোজেন পরমাণু ভূমিস্তরে থাকে, অর্থাৎ এর কক্ষীয় ইলেকট্রনের কোয়ান্টাম সংখ্যা $n=1$। $Z=1$ এবং $n=1$ বসিয়ে আমরা হাইড্রোজেন পরমাণুর ব্যাসার্দ্ধের যে পরিমাণ পাই তা হ'ল

$$r = 0{\cdot}53 \times 10^{-8} \text{ সেমি}$$

গ্যাস বলবিজ্ঞানের সাহায্যে সম্পূর্ণ নিরপেক্ষভাবে পরমাণুর ব্যাসার্দ্ধ নির্ণয় করার একটি উপায় আছে, সেভাবে প্রাপ্ত ব্যাসার্দ্ধের মানের সঙ্গে এই পরিমাণ সম্পূর্ণ সামঞ্জস্যপূর্ণ।

বোরের কোয়াণ্টাম প্রকল্প ও ডিব্রগলি তরঙ্গ

ডিব্রগলির পদার্থতরঙ্গ তত্ত্বের সাহায্য নিয়ে বোরের কোয়াণ্টাম প্রকল্পের (4·15 সূত্র) একটি সুন্দর ব্যাখ্যা দেওয়া যায়, বাস্তবিকপক্ষে বোরের এই কোয়াণ্টাম সর্ত্তটি ব্যাখ্যা করাই ছিল পদার্থতরঙ্গ-তত্ত্বের উদ্ভাবনের প্রাথমিক উদ্দেশ্য। ডিব্রগলির মতানুযায়ী, ইলেকট্রনের তরঙ্গধর্ম্ম থেকে প্রতীয়মান হয় যে, কেন্দ্রীনের চারপাশে বোর কক্ষগুলিতে ইলেকট্রনটি এমন তরঙ্গিত অবস্থায় থাকবে যাতে ঐ কক্ষগুলির পরিধি হয় ইলেকট্রন তরঙ্গদৈর্ঘ্যের নির্দ্দিষ্ট অখণ্ড সংখ্যক গুণিতক। 4·8 চিত্রে ইলেকট্রনের তরঙ্গিত গতিপথ দেখান হয়েছে, এখানে মোট পাঁচটি পূর্ণদৈর্ঘ্য তরঙ্গ আছে, এরা কেন্দ্রীনের চারপাশে স্থিতিশীল তরঙ্গের সৃষ্টি করছে। ডিব্রগলির প্রস্তাবটি সাধারণ দৃষ্টিতে খুবই যুক্তিসঙ্গত কারণ যদি কক্ষপথের দৈর্ঘ্য কতগুলি অখণ্ড সংখ্যক তরঙ্গদৈর্ঘ্যের সমান না হয়, তবে এই ধরনের স্থিতিশীল তরঙ্গের অস্তিত্ব সম্ভব হবে না। বোর কক্ষগুলি বৃত্তাকার এবং এদের ভিতর যদি স্থিতিশীল তরঙ্গের অস্তিত্ব থাকে তবে নিম্নলিখিত সর্ত্তটি প্রতিপালিত হতে হবে

চিত্র 4·8

$$n\lambda = 2\pi r$$

n মোট তরঙ্গসংখ্যা এবং r কক্ষের ব্যাসার্দ্ধ। কিন্তু ডিব্রগলি প্রকল্প অনুসারে

$$\lambda = \frac{h}{mv}$$

সুতরাং

$$mvr = \frac{nh}{2\pi} = n\hbar$$

এইভাবে 4·15 বোর সর্ত্তটি আমরা উদ্ধার করতে পারি।

হাইড্রোজেন বর্ণালীর বোর তত্ত্ব ঐতিহাসিক দিক থেকে পরমাণু বিজ্ঞানের উন্নতির ক্ষেত্রে অত্যন্ত মূল্যবান প্রমাণিত হয়েছে। বোরের পূর্ব্বে প্ল্যাঙ্ক এবং আইনস্টাইন আলোর বিকিরণ ও শোষণ ক্রিয়ার কোয়াণ্টাম প্রকৃতি আবিষ্কার করেন কিন্তু পরমাণুর ভিতর থেকে কিভাবে কোয়াণ্টাম পদ্ধতিতে বিকিরণ ঘটছে তা সর্ব্বপ্রথম একটি সহজ গঠনকল্পের সাহায্যে প্রদর্শন করার কৃতিত্ব অর্জ্জন করেন বিজ্ঞানী বোর। সেইসঙ্গে বোর তত্ত্ব রাদারফোর্ড প্রস্তাবিত পরমাণুর গঠনপ্রকল্পকেও সুদৃঢ় ভিত্তিতে স্থাপিত করে। আমরা আগেই বলেছি,

ম্যাকসওয়েলীয় তড়িৎচুম্বকীয় মতবাদ অনুসারে কেন্দ্রীনের চতুষ্পার্শে আবর্তনশীল ইলেকট্রনের স্থায়ী কক্ষপথের অস্তিত্ব সম্ভব নয়। কিন্তু ইলেকট্রন-কক্ষপথটিকে একটি স্থিতিশীল তরঙ্গ (standing wave) হিসাবে মেনে নিলে তখন বিকিরণশূন্য বৃত্তাকার কক্ষপথে ভ্রমণের সেই তাত্ত্বিক অসুবিধা দূরীভূত হয়। বোরের প্রকল্পগুলি পরবর্তীকালে পদার্থবিজ্ঞানকে ব্যাপকভাবে প্রভাবিত করেছে। বোর প্রকল্পগুলি বিশ্লেষণ করতে গিয়েই পদার্থের তরঙ্গধর্মগুলি আবিষ্কৃত হয়েছে এবং এই পদার্থতরঙ্গের ধারণা থেকে কোয়াণ্টাম বলবিজ্ঞানের জন্ম হয়েছে। অবশ্য কোয়াণ্টাম বলবিজ্ঞানের সাহায্যে পরমাণুর গঠন ও বিকিরণের প্রকৃতি আরও ব্যাপক ও নির্ভুলভাবে বিশ্লেষিত হয়েছে, কিন্তু তা সত্ত্বেও আজও একটি সহজবোধ্য গঠনকল্প হিসাবে বোর প্রদত্ত হাইড্রোজেন বর্ণালীর তত্ত্ব ছাত্র ও গবেষকদের নিকট বিশেষ মূল্যবান।

চৌম্বক ভ্রামক

তড়িৎচুম্বকীয় তত্ত্ব থেকে আমরা জানি যে, বৃত্তাকার বিদ্যুৎপ্রবাহ একটি চুম্বকের মতই ব্যবহার করে এবং এই চুম্বকের দুই মেরু অঞ্চল বৃত্তের দুই বিপরীত পার্শ্বে অবস্থিত থাকে। এই দৃষ্টান্ত অনুসরণ ক'রে সহজেই ধারণা করা যায় যে, হাইড্রোজেন পরমাণুর ভিতর নির্দিষ্ট কক্ষপথে ইলেকট্রনের আবর্তনের ফলে সমগ্র পরমাণুটি একটি ক্ষুদ্র চুম্বকের মত ব্যবহার করবে, তড়িৎচুম্বকীয় তত্ত্বের সাহায্যে এই চুম্বকের ভ্রামক সহজেই গণনা করা যায়। বিদ্যুৎপ্রবাহজনিত চৌম্বক ভ্রামক নিম্নলিখিত সূত্রের সাহায্যে প্রকাশিত

$$\mu_B = \text{বিদ্যুৎপ্রবাহ} \times \text{কক্ষটির ক্ষেত্রফল}/c$$

যদি কক্ষের ব্যাসার্ধ r এবং ইলেকট্রনের গতিবেগ হয় v, তবে $\frac{ev}{2\pi r}$ হ'ল বিদ্যুৎপ্রবাহের পরিমাণ যা ইলেকট্রনটির কক্ষীয় আবর্তনের ফলে সৃষ্টি হয়, সুতরাং

$$\mu_B = \pi r^2 \times \frac{ev}{2\pi rc} = \frac{emvr}{2mc}$$

বোর প্রকল্প থেকে

$$mvr = nh$$

সুতরাং $$\mu_B = \frac{nhe}{2mc} \quad \cdots \quad \cdots \quad 4{\cdot}29$$

$\frac{eh}{2\pi mc}$ রাশিটিকে বলা হয় চৌম্বক ভ্রামকের বোর একক, এর মান হ'ল 0.918×10^{-20} আর্গ/গস। এটি একটি খুবই সুবিধাজনক একক, পরমাণুদের ইলেকট্রনজনিত চৌম্বক ভ্রামক সমস্ত ক্ষেত্রেই এই এককের সাহায্যেই প্রকাশ করা হয়। বোর তত্ত্ব থেকে প্রাপ্ত এই ফলাফলটি অবশ্য একটু সতর্কতার সঙ্গে ব্যবহার করতে হবে, কারণ কোয়াণ্টাম বলবিজ্ঞানের সাহায্যে দেখান সম্ভব যে ভূমিস্তরে হাইড্রোজেনের কক্ষীয় কৌণিক ভরবেগের পরিমাণ শূন্য, সুতরাং কক্ষীয় চৌম্বক ভ্রামকও শূন্য। কিন্তু 4·29 সূত্রটি হাইড্রোজেনের ভূমিস্তরে $(n=1)$ নির্দিষ্ট মানের চৌম্বক ভ্রামকের অস্তিত্ব নির্দেশ করে।

আয়নীভবন (Ionisation)

আমরা দেখেছি যে হাইড্রোজেন পরমাণুর অভ্যন্তরস্থ একটি ইলেকট্রনের মোট শক্তি একটি ঋণরাশি, মোট শক্তি যেহেতু ঋণরাশি এজন্যই ইলেকট্রন পরমাণুর ভিতর আবদ্ধ থাকতে সক্ষম। মোট শক্তির পরিমাণ যদি ধনরাশি হয় তবে বোঝায় যে ইলেকট্রনটি কেন্দ্রীনের কুলম্ব আকর্ষণী বলের প্রভাবমুক্ত অর্থাৎ এটি পরমাণুর বন্ধনমুক্ত। 4·17 সূত্র থেকে দেখা যায় যে ইলেকট্রন কক্ষের ব্যাসার্দ্ধ যত অধিক হয় এর মোট শক্তির পরিমাণ তত ক্রমশঃ বৃদ্ধি পেতে থাকে এবং ক্রমশঃ তা $E=0$ পরিমাণের নিকটবর্ত্তী হয় যখন r-এর পরিমাণ খুব বেশী হয়। যখন $E=0$ তখনই ইলেকট্রনটি পরমাণুর বন্ধনমুক্ত হবে; এই ঘটনাকে অর্থাৎ ইলেকট্রনের পরমাণুর ভিতর থেকে বহির্গমনকে বলা হয় আয়নীভবন। গণনায় দেখা যায় যে ভূমিস্তরে হাইড্রোজেনের ভিতর ইলেকট্রনের মোট শক্তি -13.6 ইভি, সুতরাং হাইড্রোজেনের আয়নীভবন ঘটতে হলে বাইরে থেকে ইলেকট্রনটির ভিতর মোট 13·6 ইভি পরিমাণ শক্তি সঞ্চারিত করতে হবে। এই শক্তিকে বলা হয় আয়নীভবন শক্তি, একে হাইড্রোজেন পরমাণুর ভিতর ইলেকট্রনের বন্ধনশক্তিও আখ্যা দেওয়া হয়। যেসব উপায়ে পরমাণুস্থ ইলেকট্রনকে উত্তেজিত করা যায় ঠিক সেইভাবেই এর ভিতর আয়নীভবন শক্তি সঞ্চারিত করা যায়। পরীক্ষাগারে একটি সহজ পদ্ধতি হ'ল ত্বরিত ইলেকট্রনের সাহায্যে হাইড্রোজেন পরমাণুকে আঘাত করা, এর দ্বারা ত্বরিত ইলেকট্রনটি এর সমস্ত শক্তি আবদ্ধ ইলেকট্রনটির মধ্যে সঞ্চারিত করতে পারে। যে বিভব ব্যবধানের দ্বারা একটি ইলেকট্রনকে ত্বরিত করলে এটি ঠিক আয়নীভবন শক্তির সমান শক্তি অর্জন করবে তাকে বলা হয় আয়নীভবন বিভব। এই বিভব ব্যবধানের দ্বারা ত্বরিত ইলেকট্রনের আঘাতে আয়নীভবন ঘটে। পরমাণুর আয়নীভবন শক্তি স্পষ্টই নির্ভর

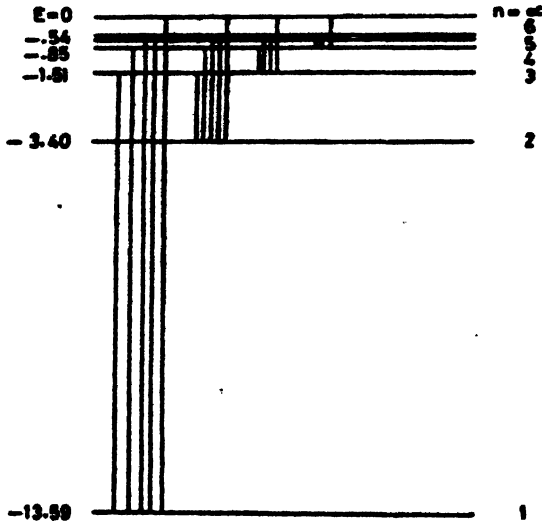
করে ইলেকট্রনটি কোন শক্তিস্তরে অবস্থান করছে তার উপর ; 4·19 সমীকরণ থেকে, ভূমিস্তরে ($n=1$) অবস্থিত হাইড্রোজেন পরমাণুর ক্ষেত্রে আয়নীভবন শক্তির পরিমাণ হবে

$$E_{\infty}-E_1=\frac{e^4m}{2h^2}=13·59 \text{ ইভি}$$

তেমনি ইলেকট্রনটি যদি 4·6 চিত্রের তৃতীয় কক্ষে থাকে তবে সেক্ষেত্রে আয়নীভবন শক্তির পরিমাণ হবে

$$E_{\infty}-E_3=\frac{e^4m}{18h^2}=1·51 \text{ ইভি}$$

পরীক্ষায় আয়নীভবন শক্তির পরিমাণ যা পাওয়া যায় তা উপরোক্ত ফলাফলের সঙ্গে অভিন্ন। যেসব পরমাণুর ভিতর একাধিক ইলেকট্রন থাকে, তাদের মধ্যে ভূমিস্তরেও ইলেকট্রনগুলি বিভিন্ন বন্ধনশক্তিবিশিষ্ট বিভিন্ন কক্ষে থাকতে পারে, এইসব পরমাণুর সাধারণতঃ একাধিক আয়নীভবন শক্তি থাকে।

4·9 চিত্রে নূতনভাবে হাইড্রোজেন পরমাণুর শক্তিস্তরগুলি দেখান হয়েছে। প্রত্যেকটি স্তরের শক্তি এর বাঁপাশে ইলেকট্রন ভোল্টে লেখা হয়েছে এবং

চিত্র 4·9
বোর তত্ত্ব অনুযায়ী হাইড্রোজেনের শক্তিস্তর চিত্র।

ডানপাশে ঐ স্তরের কোয়ান্টাম সংখ্যা n নির্দেশ করা হয়েছে। লাইমান, বামার, ইত্যাদি শ্রেণীগুলি কিভাবে সৃষ্টি হয় এই শক্তিস্তর চিত্রটি থেকেও তা বোঝা যাবে।

বোর তত্ত্বের বিস্তৃতি সাধন : উপবৃত্তীয় কক্ষ (Elliptic orbit)

বোর তত্ত্ব যথেষ্ট নির্ভুলভাবে হাইড্রোজেন বর্ণালীর রেখাগুলির অবস্থান নির্দেশ করে, কিন্তু আরও সূক্ষ্মতর পরীক্ষায় লক্ষ্য করা যায় যে এই রেখাগুলি একক নয়। এদের মধ্যে একধরণের সূক্ষ্ম বিভাজনের অস্তিত্ব দেখা যায়, অর্থাৎ প্রতিটি রেখা আসলে খুব পাশাপাশি অবস্থিত কতগুলি রেখার সমষ্টি। শক্তিস্তরের ধারণার ভিত্তিতে এই ঘটনার ব্যাখ্যা দেওয়া যায় এইভাবে যে, বোর তত্ত্বের একটিমাত্র কোয়াণ্টাম সংখ্যা n-এর অধীন একটিমাত্র শক্তিস্তরের পরিবর্তে বাস্তবে একাধিক শক্তিস্তর খুব ঘন সান্নিহিতভাবে অবস্থান করে। বিজ্ঞানী সমারফেল্ড (Sommerfeld) বোর তত্ত্বের উপর কিছু শুদ্ধীকরণ প্রয়োগ ক'রে হাইড্রোজেন পরমাণু ও হিলিয়াম আয়নের শক্তিস্তরগুলির এই সূক্ষ্ম বিভাজন কিছু পরিমাণে ব্যাখ্যা করতে সক্ষম হয়েছিলেন। সমারফেল্ড শুধুমাত্র বৃত্তীয় কক্ষপথের বদলে বৃত্তীয় এবং উপবৃত্তীয় (elliptical) উভয় প্রকার কক্ষের অস্তিত্ব বিচার করেছেন। এইসব উপবৃত্তীয় কক্ষগুলিতে আবর্তনশীল ইলেকট্রনের আপেক্ষিকতাভিত্তিক গতিবেগের সাথে সাথে ভরের পরিবর্তন হয়। এই নূতন ধারণাগুলি প্রবর্তন ক'রে সূক্ষ্ম বিভাজিত স্তরগুলির যুক্তি-সঙ্গত ব্যাখ্যা দেওয়া সম্ভব হয়।

উপবৃত্তীয় কক্ষে আবর্তনশীল ইলেকট্রনের দুটি পরিবর্তনশীল স্থানাঙ্ক আছে। মেরুকেন্দ্রীক অক্ষের কাঠামোতে ঐ স্থানাঙ্কগুলি হ'ল ব্যাসমুখী (radial) দূরত্ব r এবং কৌণিক বিচ্যুতি θ। এই দুই স্থানাঙ্কের দ্বারা দুই রকম শক্তির প্রকারভেদ সৃষ্টি হয় যাদের উভয়ের উপরই কোয়াণ্টাম সর্ত আরোপ করতে হবে। সমারফেল্ড এবং উইলসন একরকম নূতন উপায়ে কোয়াণ্টাম সর্তগুলি আরোপের নিয়ম বের করলেন যা যেকোন অনুক্রমিক (periodic) গতি এবং সাধারণ স্থানাঙ্কের ক্ষেত্রেই প্রযোজ্য। নিয়মটি হচ্ছে এই, যেকোন স্থানাঙ্কের ক্ষেত্রেই এদের তথাকথিত "কর্ম্ম-সমাকল" (action integral) যা গতির একটি পূর্ণ পর্য্যায়কাল (time period) ধরে গৃহীত হয়েছে, তা হবে h-এর একটি পূর্ণসংখ্যক গুণিতক। গাণিতিক উপায়ে এই নিয়মটি নিম্নলিখিত সমীকরণের দ্বারা উপস্থাপিত করা হয়

$$\oint p_i \, dq_i = n_i h$$

এখানে p_i হ'ল কোন সাধারণ ভরবেগ যা সাধারণ স্থানাঙ্ক q_i-এর সঙ্গে সংশ্লিষ্ট, বাঁদিকের যোজকটির মাত্রা আর্গ × সেকেণ্ড অর্থাৎ প্ল্যাঙ্কের ধ্রুবকের মাত্রার সঙ্গে অভিন্ন। এই সমাকলটিকেই "কর্ম্ম-সমাকল" (action integral) আখ্যা দেওয়া হয়। বলবিজ্ঞানের সাধারণ নীতিগুলির দ্বারা প্রতিটি স্থানাঙ্কের

জন্যই তাদের সঙ্গে সংশ্লিষ্ট ভরবেগগুলি নির্ধারণ করা যায় এবং এইভাবে যেকোন বিশেষ ক্ষেত্রে উপরোক্ত সমাকলটির মান নির্ণয় করা সম্ভব। বর্তমান ক্ষেত্রে যখন q_ϕ=ঘূর্ণনকোণ ϕ, তখন p_ϕ হ'ল কক্ষীয় কৌণিক ভরবেগ। অপর ভরবেগটি p_r, এটি স্থানাঙ্ক r-এর সঙ্গে সংশ্লিষ্ট।

আমরা পূর্বেই দেখেছি যে, কেন্দ্রীয় বলের মাধ্যমে পরিক্রিয়ারত ইলেকট্রন ও কেন্দ্রীন সমবায়ের কৌণিক ভরবেগ হবে একটি ধ্রুবক। সুতরাং এই সমবায়ের জন্য আমরা লিখতে পারি

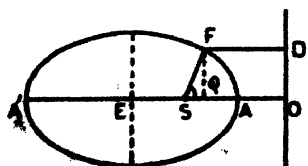
$$\int p_\phi d_\phi = p_\phi \int_0^{2\pi} d\phi = 2\pi p_\phi.$$

অর্থাৎ
$$p_\phi = n_\phi \cdot \frac{h}{2\pi} = n_\phi \hbar \qquad 4{\cdot}31$$

লক্ষণীয় যে কৌণিক ভরবেগ কোয়াণ্টীভবনের (quantisation) জন্য বোর যে সর্তটি (4·15) দিয়েছেন তা উপরোক্ত সর্তের সঙ্গে অভিন্ন। n_ϕ রাশিটিকে বলা যেতে পারে কৌণিক গতির সঙ্গে সংশ্লিষ্ট কোয়াণ্টাম সংখ্যা। তির্য্যক্ ভরবেগ p_r-এর সঙ্গে সংশ্লিষ্ট কোয়াণ্টাম সংখ্যাটি নির্ণয় করতে হলে নিম্নলিখিত কোয়াণ্টাম সর্তটি সমাধান করতে হবে

$$\int p_r \, dr = n_r h \qquad \cdots \quad 4{\cdot}32$$

বর্তমান ক্ষেত্রে বাঁদিকের সমাকলটি নির্ণয় করা কিঞ্চিৎ আয়াসসাধ্য, তবে সবিস্তারে বর্ণনা করা হবে।

উপবৃত্তীয় কক্ষের জন্য 4·32 সমীকরণের সমাকলটি নির্ণয় করতে হলে উপবৃত্তের কতগুলি জ্যামিতিক ধর্ম্মাবলী আমাদের জানা প্রয়োজন এবং প্রথমে আমরা এগুলির সম্বন্ধে কিছু আলোচনা করব। 4·10 চিত্রে একটি উপবৃত্ত আঁকা হয়েছে। S বিন্দু এর ফোকাস, E কেন্দ্র, DO-এর মানরেখা (directrix), A ও A′ দুটি শীর্ষবিন্দু এবং F হ'ল উপবৃত্তটির উপর যেকোন একটি বিন্দু। উপবৃত্তের ধর্ম্ম থেকে আমরা পাই

চিত্র 4·10

$$\frac{FS}{FD} = \varepsilon = \text{বৃত্তবৈকল্য (eccentricity)}$$

: ধ্রুবক

উপবৃত্তের যেকোন বিন্দুর জন্যই উপরোক্ত সর্তটি পালিত হবে। ধরা যাক, SO $= s$

সুতরাং

$$\frac{FS}{FD} = \frac{FS}{SO - FS\cos\phi} = \frac{r}{s - r\cos\phi} = \varepsilon$$

এথেকে আমরা পাই

$$\frac{1}{r}=\frac{1}{\varepsilon s}+\frac{\cos\phi}{s} \qquad \cdots \qquad 4\cdot33$$

এটিকে মেরুকেন্দ্রীক অক্ষের ভিত্তিতে উপবৃত্তের সমীকরণ হিসাবে ধরা হয়। ধরা যাক $EA=EA'=a$; A ও A′ বিন্দুদ্বয় উপবৃত্তের উপর আসে যখন যথাক্রমে $\phi=0$ এবং 2π ; আবার উপবৃত্তের সংজ্ঞা থেকে আমরা পাই

$$\frac{a-ES}{AO}=\frac{a+ES}{AO+2a}=\varepsilon$$

এথেকে AO অপনয়ন করলে

$$ES=a\varepsilon$$

যখন $\phi=0$ এবং 2π, তখন যথাক্রমে $r=a-ES=a\,(1-\varepsilon)$ এবং $r=a+ES=a(1+\varepsilon)$, এবং 4·33 সমীকরণে r-এর এই মানগুলি বসিয়ে আমরা s অপনয়ন করতে পারি। তখন উপবৃত্তের সমীকরণ শীর্ষবিন্দু থেকে কেন্দ্রের দূরত্ব 'a'-এর মাধ্যমে লেখা যায়

$$\frac{1}{r}=\frac{1+\varepsilon\cos\phi}{a\,(1-\varepsilon^2)} \qquad \cdots \qquad 4\cdot34$$

এই সূত্রটি ব্যবহার ক'রে এবার আমরা উপবৃত্তীয় কক্ষের জন্য $p_r dr$ রাশিটি নির্ণয় করব। এই সমীকরণের উভয় দিকে "লগ" নিলে এবং অবকলন করে আমরা পাই,

$$\frac{1}{r}\frac{dr}{d\phi}=\frac{\varepsilon\sin\phi}{1+\varepsilon\cos\phi} \qquad \cdots \qquad 4\cdot35$$

বলবিজ্ঞানে p_ϕ এবং p_r এর সংজ্ঞা হ'ল

$$p_\phi=mr^2\frac{d\phi}{dt}$$

$$p_r=m\frac{dr}{dt}=m\frac{dr}{d\phi}\frac{d\phi}{dt}=\frac{p_\phi}{r^2}\frac{dr}{d\phi}$$

আবার যেহেতু

$$dr=\frac{dr}{d\phi}\,d\phi$$

সুতরাং

$$p_r dr=\frac{p_\phi}{r^2}\left(\frac{dr}{d\phi}\right)^2 d\phi=p_\phi\,\varepsilon^2\cdot\frac{\sin^2\phi}{(1+\varepsilon\cos\phi)^2}\,d\phi$$

এবং এথেকে আমরা লিখতে পারি

$$\int p_r\, dr = p_\phi \cdot \varepsilon^2 \cdot \int_0^{2\pi} \frac{\sin^2 \phi}{(1+\varepsilon \cos\phi)^2}\, d\phi = n_r\, h$$

কিন্তু পূর্ববর্তী সর্ত (4·31) থেকে

$$p_\phi = n_\phi \frac{h}{2\pi}$$

সুতরাং

$$\frac{\varepsilon^2}{2\pi} \int_0^{2\pi} \frac{\sin^2 \phi}{(1+\varepsilon \cos\phi)^2}\, d\phi = \frac{n_r}{n_\phi}$$

এই সমাকলকটি নির্দ্ধারণ করলে আমরা পাই,

$$\frac{1}{\sqrt{1-\varepsilon^2}} - 1 = \frac{n_r}{n_\phi}$$

$$1-\varepsilon^2 = \frac{n_\phi^2}{(n_\phi + n_r)^2} = \frac{b^2}{a^2} \qquad \cdots \quad 4·36$$

কোয়াণ্টীভবনের নীতি অনুসারে n_r এবং n_ϕ শুধু অখণ্ড সংখ্যার মান গ্রহণ করতে পারে, সুতরাং

$$n_r + n_\phi = n \text{ এবং } n = 1, 2, 3, \cdots\cdots \qquad \cdots \quad 4·37$$

সমারফেল্ড তত্ত্বে n-কে বলা হয় প্রাথমিক কোয়াণ্টাম সংখ্যা, উপরিলব্ধ ফলাফলের দ্বারা এই কোয়াণ্টাম সংখ্যাটিকে নিম্নলিখিতভাবে উপস্থাপিত করা যায়

$$\frac{n_\phi}{n} = \frac{b}{a} \qquad \cdots \quad 4·38$$

সনাতন পদার্থবিজ্ঞান অনুযায়ী সমস্তরকম উপবৃত্তই সম্ভব কিন্তু 4·38 সর্তটি থেকে দেখা যায় যে কোয়াণ্টাম তত্ত্বে শুধু সেইসব উপবৃত্তগুলিই সম্ভব যাদের অর্দ্ধ মুখ্য অক্ষ এবং অর্দ্ধ গৌণ অক্ষদ্বয়ের অনুপাত হ'ল দুটি অখণ্ড সংখ্যার অনুপাতের সমান।

কক্ষস্থ ইলেকট্রনের শক্তি

কক্ষস্থ একটি ইলেকট্রনের মোট শক্তি কত এবার তা গণনা করা যেতে পারে ; আমরা লিখতে পারি

$$W = T + V = \tfrac{1}{2} m(v_r^2 + v_\theta^2) - \frac{e^2 Z}{r}$$

$$= \tfrac{1}{2} m\dot{r}^2 + \tfrac{1}{2} m r^2 \dot{\phi}^2 - \frac{e^2 Z}{r}$$

এবার বাঁদিকের রাশিটি p_r এবং p_ϕ-এর মাধ্যমে প্রকাশ করা যায়

$$W=\frac{1}{2m}\left(p_r^2+\frac{p_\phi^2}{r^2}\right)-\frac{e^2Z}{r}$$

$$=\frac{p_\phi^2}{2mr^2}\left[\frac{1}{r^2}\left(\frac{dr}{d\phi}\right)^2+1\right]-\frac{e^2Z}{r}$$

এবার 4·34 ও 4·35 সূত্রদ্বয় থেকে $\frac{1}{r}$ এবং $\frac{1}{r}\frac{dr}{d\phi}$-এর মান ব্যবহার করলে আমরা পাই

$$W=\frac{p_\phi^2}{ma^2(1-\varepsilon^2)^2}\left[\frac{1+\varepsilon^2}{2}+\varepsilon\cos\phi\right]-\frac{e^2Z(1+\varepsilon\cos\phi)}{a(1-\varepsilon^2)} \qquad \cdots \quad 4·39$$

হাইড্রোজেন পরমাণুর ভিতর দুটি পরিক্রিয়াশীল কণা একটি সংরক্ষণশীল সমবায়ের অন্তর্গত ; সংরক্ষণশীল অর্থ হ'ল যে, সময়ের সঙ্গে সঙ্গে এই সমবায়টির শক্তির কোন পরিবর্তন ঘটে না। কিন্তু যেহেতু $\cos\phi$-এর পরিবর্তন ঘটে সুতরাং উপরের সমীকরণে $\cos\phi$-এর সহগ হবে শূন্য, এইভাবে আমরা নিম্নলিখিত সর্তটি উদ্ধার করতে পারি

$$\frac{p_\phi^2}{ma^2(1-\varepsilon^2)^2}-\frac{e^2Z}{a(1-\varepsilon^2)}=0$$

$$a=\frac{p_\phi^2}{me^2Z(1-\varepsilon^2)} \qquad \cdots \quad 4·40$$

p_ϕ এবং $1-\varepsilon^2$-এর মান বসালে অর্দ্ধ মুখ্য অক্ষের (semi major axis) জন্যে নিম্নলিখিত সম্বন্ধটি পাওয়া যায়

$$a=\frac{h^2}{me^2Z}(n_\phi+n_r)^2=a_1\frac{n^2}{Z} \qquad \cdots \quad 4·40a$$

এবং এথেকে

$$b=\frac{h^2}{me^2Z}n_\phi(n_\phi+n_r)=a_1\frac{n_\phi n}{Z}$$

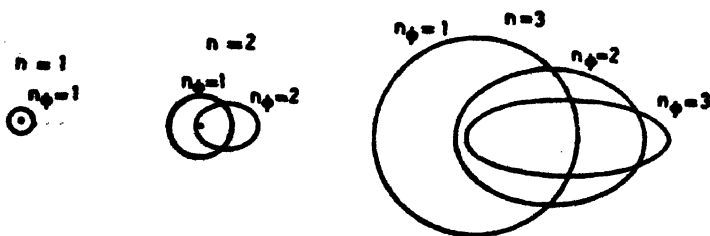
a_1 হ'ল হাইড্রোজেনের প্রথম বোর কক্ষের ব্যাসার্দ্ধ। সুতরাং 'a'-এর মান 4·39 সম্বন্ধে প্রয়োগ ক'রে মোট শক্তির জন্য আমরা লিখতে পারি

$$W=\frac{e^2Z}{a(1-\varepsilon^2)}\left\{\frac{1+\varepsilon^2}{2}-1\right\}$$

$$=-\frac{me^4Z^2}{2h^2n^2} \qquad \cdots \quad 4·41$$

যখন $1-\varepsilon^2=1$, $\varepsilon=0$, $b=a$ তখন উপবৃত্তটি হয় একটি বৃত্ত ; আবার যখন $1-\varepsilon^2=0$ তখন $n_\phi=0$, $b=0$ এবং উপবৃত্তটি পরিণত হয় একটি সরলরেখায়। দ্বিতীয় সম্ভাবনাটি বাস্তবে বোঝায় যে ইলেকট্রনটি কেন্দ্রীনের মধ্য দিয়ে একটি সরলরেখায় স্পন্দিত হতে থাকবে। এই সম্ভাবনাটি সমারফেল্ড-বোর তত্ত্বে বাতিল ক'রে দেওয়া হয়েছিল এই হিসাবে যে এর কোন ভৌত বাস্তবতা থাকতে পারে না। সুতরাং n_ϕ-এর পরিমাণ হতে পারে $n_\phi=1, 2, 3, \cdots$। তবে n_r-এর শূন্য পরিমাণ ধরা যেতে পারে, সুতরাং এর পরিমাণগুলি হবে $n_r=0, 1, 2, 3, \cdots$, এদের যোগফল $n_\phi+n_r=n$-এর পরিমাণ হতে পারে $1, 2, 3, \cdots$। সুতরাং এই নূতন প্রাথমিক কোয়াণ্টাম সংখ্যা n-এর যেকোন্ পরিমাণের জন্য n_ϕ-এর পরিমাণ হতে পারে

$$n_\phi=1, 2, 3, \cdots, n \text{ এবং } n_r=n-n_\phi$$

4·40 এবং 4·41 সমীকরণ থেকে আমরা দেখি যে অর্দ্ধমুখ্য অক্ষ a এবং শক্তি W-এর পরিমাণ একমাত্র প্রাথমিক কোয়াণ্টাম সংখ্যা n-এর দ্বারাই নির্দ্ধারিত হয়। এক্ষেত্রে মোট শক্তির পরিমাণ, ব্যাসার্দ্ধ a এবং কোয়াণ্টাম সংখ্যা n সমন্বিত বোর কক্ষের শক্তির সঙ্গে অভিন্ন, কক্ষটির আকৃতি অবশ্য নির্দ্ধারিত হয় n_ϕ/n অনুপাতের দ্বারা। 4·11 চিত্রে হাইড্রোজেন পরমাণুর ক্ষেত্রে প্রাথমিক কোয়াণ্টাম সংখ্যা $n=1, 2$ এবং 3 এর অধীন বিভিন্ন কৌণিক কোয়াণ্টাম সংখ্যার জন্য সমারফেল্ড তত্ত্ব অনুসরণ ক'রে হাইড্রোজেন পরমাণুর কক্ষগুলি আঁকা হয়েছে।

চিত্র 4·11

সমারফেল্ডের তত্ত্ব অনুযায়ী আঁকা কতগুলি উপবৃত্তীয় কক্ষ।

উপরোক্ত আলোচনা থেকে আমরা দেখি যে, যদিও নির্দিষ্ট প্রাথমিক কোয়াণ্টাম সংখ্যা n-এর জন্য একাধিক কক্ষপথ সম্ভব কিন্তু ঐসব কক্ষগুলিতে শক্তির পরিমাণ অভিন্ন, কারণ শক্তি নির্ভর করে শুধু প্রাথমিক কোয়াণ্টাম সংখ্যার উপর। সুতরাং বিকিরিত স্পন্দনাঙ্ক নির্ভর করবে শুধু প্রাথমিক ও

প্রান্তিক n-এর পরিমাণদ্বয়ের উপর, অর্থাৎ একাধিক বিভিন্ন বর্তন (প্রাথমিক ও প্রান্তিক n_ϕ-এর পরিমাণ বিভিন্ন) একই স্পন্দনাঙ্কের বিকিরণ সৃষ্টি করবে। সুতরাং যদিও বর্তমান সমবায়টির ভিতর দুই প্রকারের শক্তির প্রকারভেদ রয়েছে, কিন্তু দেখা যাচ্ছে যে শুধু একটিমাত্র কোয়াণ্টাম সংখ্যাই এর শক্তিস্তরগুলির অবস্থান নির্দেশ করে। এই ধরণের সমবায়কে বলা হয় অভিন্নশক্তি সমবায়।

সুতরাং যদিও একটি নূতন গঠনকল্প আলোচনা করা হ'ল কিন্তু তাতে বিশেষ লাভ হ'ল না, কারণ বোর তত্ত্বের ফলাফলের সঙ্গে সমারফেল্ড তত্ত্বের ফলাফল অভিন্ন বলে প্রমাণিত হ'ল। পরে সমারফেল্ড দেখালেন যে, এক ইলেকট্রনবিশিষ্ট পরমাণুর ক্ষেত্রে এই শক্তির অভিন্নতা সরিয়ে দেওয়া যায় যদি ইলেকট্রনের গতির উপর আপেক্ষিকতাভিত্তিক গতিবেগের সাথে সাথে ভরের পরিবর্তনজনিত শুদ্ধীকরণ প্রয়োগ করা হয়। একটি উপবৃত্তীয় কক্ষে ইলেকট্রনের বেগ (speed) পরিবর্তিত হতে থাকে (বৃত্তীয় কক্ষে ধ্রুব থাকে), ইলেকট্রনটি কেন্দ্রীনের যত নিকটে যেতে থাকে তত এর বেগ অধিক হয়। আপক্ষিকতার বিশেষ তত্ত্ব অনুযারী ইলেকট্রনের ভর এর বেগের সাথে সাথে পরিবর্তিত হয়। যদি এই ভরের পরিবর্তনজনিত প্রতিক্রিয়া সমারফেল্ডের তত্ত্বে সংযোজিত হয় তবে দেখা যায় যে তখন কোন একটি কক্ষের শক্তি n এবং n_ϕ উভয়ের উপরই নির্ভর করে। আপেক্ষিকতা তত্ত্ব প্রয়োগের গাণিতিক সমস্যা অপেক্ষাকৃত জটিল, আমরা শুধু সমারফেল্ড প্রদত্ত সর্ব্বশেষ ফলাফলটি নির্দ্দেশ করব। এই তত্ত্বানুসারে (n, n_ϕ) কোয়াণ্টাম সংখ্যা সমন্বিত ইলেকট্রনের শক্তি হবে

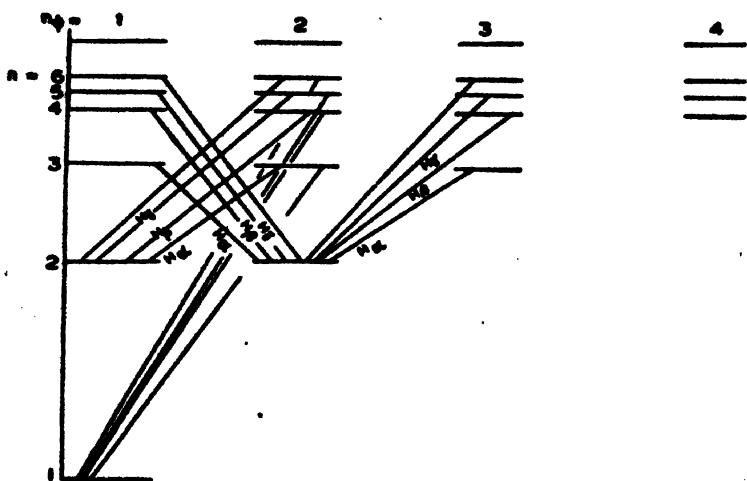
$$W_{n, n_\phi} = -\frac{2\pi^2 \mu\, e^4 Z^2}{n^2 h^2}\left\{1+\frac{\alpha^2 Z^2}{n}\left(\frac{1}{n_\phi}-\frac{3}{4n}\right)\right\} \quad \cdots \quad 4{\cdot}42$$

এখানে $\alpha = \frac{2\pi e^2}{hc} = \frac{1}{137}$; 'α' কে বলা হয় সূক্ষ্ম বিভাজন ধ্রুবক। n_ϕ-এর উপর শক্তির নির্ভরশীলতা অবশ্য কম, কারণ সূক্ষ্ম বিভাজন ধ্রুবকের পরিমাণ খুবই কম, এর ফলে শক্তির পার্থক্য হয় খুবই সামান্য, এর দ্বারা কতগুলি সূক্ষ্ম বিভাজিত স্তরের আবির্ভাব ঘটে।

হাইড্রোজেনের বামার রেখাগুলির মধ্যে যখন সমারফেল্ডের এই আপেক্ষিকতাভিত্তিক তত্ত্বের সঙ্গে পরীক্ষালব্ধ ফলাফলের তুলনা করা হ'ল, তখন দেখা গেল যে পরীক্ষালব্ধ রেখাগুলির তুলনায় অনেক অধিকসংখ্যক রেখা এই তত্ত্ব ভবিষ্যদ্বাণী করছে। তত্ত্ব এবং পরীক্ষার মধ্যে মিল সৃষ্টি করা সম্ভব হ'ল একটি পরিচয়ন নীতির (selection rule) সূত্রপাত ক'রে যা বিভিন্ন

পরাবর্তনজনিত রেখাগুলির সংখ্যাকে সীমিত করে। এই ক্ষেত্রে পরিচয়ন নীতিটি হচ্ছে এই : শুধু সেই সব পরাবর্তনগুলিই সম্ভব যাদের মধ্যে নিম্নলিখিত সর্তটি পালিত হবে

$$\Delta n_\phi = \pm 1 \qquad \cdots \quad 4{\cdot}43$$

Δn_ϕ বোঝায় প্রাথমিক ও প্রান্তিক n_ϕ সংখ্যাদ্বয়ের মধ্যে পার্থক্যের পরিমাণ। পরবর্তী কালে কোয়াণ্টাম বলবিজ্ঞানের প্রয়োগের দ্বারা এ ধরণের অনেক পরিচয়ন নীতি স্থাপিত করা সম্ভব হয়েছে, পরবর্তী অধ্যায়ে এদের কিছু নিদর্শন দেওয়া হবে। 4·12 চিত্রে সমারফেল্ড তত্ত্ব এবং 4·43 পরিচয়ন নীতি অনুযায়ী হাইড্রোজেন বর্ণালীর সূক্ষ্ম বিভাজন কিভাবে উদ্ভব হয় তাহা বোঝান হয়েছে। যেসমস্ত স্তরের n_ϕ-এর পরিমাণ বিভিন্ন এখানে তাদের পাশাপাশি সরিয়ে দেখান হয়েছে, যদিও একই উচ্চতায়। যেসমস্ত স্তরের n-এর পরিমাণ বিভিন্ন কিন্তু n_ϕ অভিন্ন সেগুলিকে একটির উপরে আরেকটি হিসাবে আঁকা হয়েছে, যেকোন দুটি স্তরের মধ্যে লম্ব-দূরত্ব এদের মধ্যে শক্তির পার্থক্য নির্দেশ করে।

চিত্র 4·12

বোর-সমারফেল্ড তত্ত্ব অনুসারে প্রাপ্ত বিভিন্ন শক্তিস্তর এবং এদের ভিতর পরাবর্তন।

দুই বিভিন্ন n-এর মধ্যে পরাবর্তন বোঝাতে যে উল্লম্ব রেখাগুলি ব্যবহার করা হয় (4·9 চিত্র) তাদের স্থলে এবার কোণাকুনি রেখাগুলি আসবে, অর্থাৎ H_α, H_β, H_γ ইত্যাদি রেখাগুলি যেগুলি $\Delta n_\phi = \pm 1$ পরাবর্তন নির্দেশ করে। এই চিত্রে n-এর সমপরিমাণ কিন্তু n_ϕ-এর বিভিন্ন পরিমাণের জন্য শক্তিস্তরগুলি একই উচ্চতায় দেখান হয়েছে, কিন্তু বাস্তবে তা ঠিক নয়

কারণ 4·42 সূত্র অনুসারে n_s-এর বৃদ্ধির সাথে সাথে শক্তিস্তরগুলি ক্রমশঃ নীচে নেমে আসতে থাকবে। তবে এই পার্থক্য এতই সামান্য যে একই মাপনীতে শক্তিস্তরগুলি এবং তাদের সূক্ষ্ম বিভাজন এখানে দেখান সম্ভব নয়। উদাহরণস্বরূপ, হাইড্রোজেনের বামার শ্রেণীর H_a রেখাটি দুটি সূক্ষ্মবিভাজিত রেখায় বিভক্ত থাকে, যাদের তরঙ্গদৈর্ঘ্যের পার্থক্য মাত্র 0·14A°।

বোর-সমারফেল্ড তত্ত্বের দুর্ব্বলতা

যদিও আপেক্ষিকতাভিত্তিক উপবৃত্তীয় কক্ষ কল্পনা ক'রে হাইড্রোজেন বর্ণালীর সূক্ষ্মবিভাজন ব্যাখ্যা করা যেতে পারে কিন্তু বর্ণালীর আরও অনেকগুলি সমস্যা আছে যা এই তত্ত্বের প্রয়োগের দ্বারা সুষ্ঠুভাবে ব্যাখ্যা করা সম্ভব নয়। বিশেষ সমস্যার উদ্ভব হয় জীম্যান প্রক্রিয়া ব্যাখ্যা করতে গিয়ে, পরবর্ত্তী অধ্যায়ে এই প্রক্রিয়ার বিবরণ দেওয়া হবে। দেখা যায় যে প্রক্রিয়াটি ব্যাখ্যা করতে হলে একটি নূতন কোয়াণ্টাম সংখ্যা এবং একটি নূতন পরিচয়ন নীতি ব্যবহারের প্রয়োজন হয়, কিন্তু তা সত্ত্বেও এই প্রক্রিয়ার সমস্ত জটিলতাগুলি বিশ্লেষণ করা যায় না। এছাড়া ক্ষার পরমাণুর বর্ণালীর রেখাগুলিতে যে দ্বিত্ব বিভাজন লক্ষ্য করা যায় তাও একটি নূতন সমস্যার সৃষ্টি করে। বোর-সমারফেল্ড তত্ত্বকে পরিবর্ত্তিত ক'রে এইসব প্রক্রিয়াগুলির আংশিক বিবরণ দেওয়া যায় কিন্তু তা মোটেই আশানুরূপ নয়। ক্রমশঃ বোঝা গেল যে, বোর-সমারফেল্ড তত্ত্বের দ্বারা পরমাণুর শক্তিস্তরগুলির সমস্ত জটিলতা ব্যাখ্যা করা আদৌ সম্ভব নয় এবং তখন একটি নূতন পারমাণবিক বলবিজ্ঞান সৃষ্টির প্রয়োজন অনুভূত হ'ল। এর পরেই কোয়াণ্টাম বলবিজ্ঞান আবিষ্কৃত হবার ফলে পরমাণু বর্ণালীর যাবতীয় জটিলতাগুলির প্রথম সুষ্ঠু এবং একীকৃত ব্যাখ্যা দেওয়া সম্ভব হ'ল। পরবর্ত্তী অধ্যায়ে আমরা কোয়াণ্টাম বলবিজ্ঞান-ভিত্তিক পরমাণু বর্ণালীর বিশ্লেষণ সম্বন্ধে সংক্ষেপে আলোচনা করব।

প্রশ্নমালা

(1) হাইড্রোজেন এবং একবার আয়নিত হিলিয়ামের ভূমিস্তরে ইলেকট্রন কক্ষের ব্যাসার্দ্ধ নির্ণয় কর। দুইবার আয়নিত লিথিয়ামের ঐ ব্যাসার্দ্ধ কত?
[$0·529 \times 10^{-8}$ সেমি; $0·265 \times 10^{-8}$ সেমি; $0·176 \times 10^{-8}$ সেমি]

(2) হাইড্রোজেনের একটি আইসোটোপ আছে যার ভর সাধারণ হাইড্রোজেন পরমাণুর তুলনায় তিনগুণ বেশী, একে বলা হয় ট্রাইটিয়াম। ধরা যাক, একটি হাইড্রোজেনপূর্ণ মোক্ষণ টিউবে যথেষ্ট পরিমাণে ট্রাইটিয়াম ঢুকিয়ে

দেওয়া হয়েছে। এদের H_{α} (বামার শ্রেণীর প্রথম রেখা) রেখাদ্বয়ের মধ্যে তরঙ্গদৈর্ঘ্যের যে পার্থক্য লক্ষিত হবে তার পরিমাণ কত ?

[$\Delta\lambda = 2{\cdot}38 \times 10^{-8}$ সেমি]

(3) কত বিভব ব্যবধানে ইলেকট্রনকে ত্বরিত করলে এদের সংঘর্ষের দ্বারা (i) হাইড্রোজেন পরমাণুর শক্তি ভূমিস্তর থেকে প্রথম উত্তেজিত স্তরে উপনীত হবে, (ii) হাইড্রোজেন পরমাণুটি আয়নিত হবে ?

[10·2 ভোল্ট, 13·6 ভোল্ট]

(4) হাইড্রোজেন আইসোটোপ ডিউটেরিয়াম যার ভর হাইড্রোজেনের দ্বিগুণ, এর জন্য রিড্‌বার্গ ধ্রুবকের পরিমাণ কত হবে নির্ণয় কর। এথেকে ডিউটেরিয়াম ও হাইড্রোজেনের প্রথম তিনটি রেখার ক্ষেত্রে এদের তরঙ্গদৈর্ঘ্যের মধ্যে কত পার্থক্য হবে নির্ণয় কর।

[$R_D = 109707{\cdot}42$ সেমি$^{-1}$, H_{α} : $\Delta\lambda = 1{\cdot}79$A°,
H_{β} : $\Delta\lambda = 1{\cdot}32$A°, H_{γ} : $\Delta\lambda = 1{\cdot}18$A°]

(5) হাইড্রোজেন এবং একবার আয়নিত হিলিয়ামের বামার শ্রেণীর শ্রেণী-সীমা যথাক্রমে 2,741,940 মি$^{-1}$ এবং 2,743,050 মি$^{-1}$, এথেকে প্রোটন এবং ইলেকট্রনের ভরের অনুপাত নির্ণয় কর। [1853 : 1]

(6) হাইড্রোজেনের লাইমান শ্রেণীর একটি রেখার তরঙ্গদৈর্ঘ্য 1216A°। কোন্ দুটি শক্তিস্তরের মধ্যে পরাবর্তনের দরুণ এই রেখাটির উদ্ভব হয় ?

[$n = 2$ থেকে $n = 1$]

(7) প্রথম চারটি বোর কক্ষের প্রতিটির ব্যাসার্দ্ধ এবং এদের ভিতর ইলেকট্রনের বেগ নির্ণয় কর।

[0·526A°, 2·10A°, 4·73A°, 8·42A°,
$2{\cdot}18 \times 10^{8}$ সেমি/সেক, $1{\cdot}09 \times 10^{8}$ সেমি/সেক,
$7\,3 \times 10^{7}$ সেমি/সেক, $5{\cdot}45 \times 10^{7}$ সেমি/সেক]

(8) ধরা যাক ট্যাংস্টেনের k-ইলেকট্রনগুলির ($n = 1$) ক্ষেত্রে বোর তত্ত্ব প্রযুক্ত হতে পারে, তবে এর দ্বারা ট্যাংস্টেনের k-ইলেকট্রনের ভূমিস্তরে শক্তি এবং ইলেকট্রন কক্ষের ব্যাসার্দ্ধ কত হবে নির্ণয় কর।

[74·5 কিলোইভি ; $7{\cdot}1 \times 10^{-11}$ সেমি]

(9) কত তাপমাত্রায় হাইড্রোজেন পরমাণুর গড় গতিশক্তির পরিমাণ এত অধিক হবে যে এর দ্বারা হাইড্রোজেনের আয়নীভবন শুরু হতে পারবে ?

[$1{\cdot}06 \times 10^{5}$ °K]

(10) 6 এমইভি শক্তির প্রোটনধারার মধ্য থেকে যে অংশ একটি পাতলা সোনার পাতের দ্বারা 60°-এর চেয়ে অধিক কোণে বিচ্ছুরিত হয় তা হ'ল 2×10^{-5}, এথেকে সোনার পাতের পুরুত্ব কত নির্ণয় কর।

$$\left[d = \frac{4E^2\eta A \tan^2\theta_c/2}{\pi N\rho Z^2 e^4},\ \eta = 2\times10^{-5} \right]$$

এখানে, A সোনার পারমাণবিক ভর, Z পারমাণবিক সংখ্যা, N এ্যাভোগাড্রো সংখ্যা এবং ρ সোনার ঘনত্ব।

পঞ্চম অধ্যায়

কোয়ান্টাম সংখ্যা

বিভিন্ন কোয়ান্টাম সংখ্যাগুলির তাৎপর্য্য কি এবং কিভাবে এগুলি পরমাণুর শক্তিস্তরগুলি চিহ্নিতকরণের জন্য ব্যবহৃত হয় তা আমরা বোর-সমারফেল্ড তত্ত্ব থেকে অবগত হয়েছি। কিন্তু ঐ তত্ত্ব যে পরমাণুর শক্তিস্তরগুলি বর্ণনার ক্ষেত্রে পর্য্যাপ্ত নয় তা আগেই বলা হয়েছে। বর্ণালীর যাবতীয় জটিলতা ব্যাখ্যা করতে হলে কোয়ান্টাম বলবিজ্ঞানের প্রয়োগ একান্তই প্রয়োজন এবং বর্তমান অধ্যায়ে আমরা হাইড্রোজেন ও ক্ষারধাতুসমূহের বর্ণালী কোয়ান্টাম বলবিজ্ঞান প্রদত্ত গঠনকল্পের ভিত্তিতে আলোচনা করার চেষ্টা করব। কোয়ান্টাম বলবিজ্ঞানের বিস্তৃত আলোচনা এখানে সম্ভব নয়, শুধু সংক্ষেপে এটুকু বলা যায় যে কতগুলি ভিত্তিস্থানীয় প্রকল্পের দ্বারা এই বলবিজ্ঞান গড়ে তোলা হয়েছে। এই বলবিজ্ঞান অতি স্বাভাবিকভাবেই কোয়ান্টাম সংখ্যাগুলির অস্তিত্ব নির্দেশ করে, এক্ষেত্রে 4·32 সূত্র প্রদত্ত সমারফেল্ডের কোয়ান্টীভবন সর্তের অনুরূপ কোন সর্তের প্রয়োজন হয় না। এছাড়া বিভিন্ন পরিচয়ন নীতিগুলি সমস্তই কোয়ান্টাম বলবিজ্ঞানের সাহায্যে অতি স্বাভাবিকভাবে সংস্থাপিত করা যায়। কোয়ান্টাম বলবিজ্ঞান প্রদত্ত ফলাফল বোর-সমারফেল্ড তত্ত্বের তুলনায় অনেক বেশী ব্যাপক এবং তা সম্পূর্ণ নির্ভুলভাবে পরীক্ষালব্ধ ফলাফলকে ব্যাখ্যা করতে সক্ষম। তবে হাইড্রোজেন বর্ণালীর ক্ষেত্রে আপেক্ষিকতাভিত্তিক শুদ্ধীকরণ প্রয়োগের পর সমারফেল্ডের তত্ত্বে উপবৃত্তীয় কক্ষগুলিতে ইলেকট্রনের যে শক্তি হয় তা আধুনিক কোয়ান্টাম বলবিজ্ঞান প্রদত্ত পরিমাণের সঙ্গে প্রায় অভিন্ন। তাছাড়া কোয়ান্টাম বলবিজ্ঞান প্রদত্ত পরমাণুর শক্তিস্তর বিন্যাসের প্রকৃতি এবং বিভিন্ন কোয়ান্টাম সংখ্যাগুলির তাৎপর্য্য অনেকক্ষেত্রে বোর-সমারফেল্ড তত্ত্বের ফলাফলের অনুরূপ। আমরা এইসব সাদৃশ্যগুলিকে সম্মুখে রেখে কোয়ান্টাম তত্ত্ব প্রদত্ত ফলাফলগুলি বিশ্লেষণ করব।

কোয়ান্টাম বলবিজ্ঞানেও একাধিক কোয়ান্টাম সংখ্যা ব্যবহারের প্রয়োজন হয়, বিভিন্ন কোয়ান্টাম সংখ্যাগুলির ব্যবহারের তাৎপর্য্য হচ্ছে এই যে এদের প্রতিটি পরমাণুর ভিতর এক একটি অভিনব শক্তিস্তরকে চিহ্নিত করতে পারে। এরকম অনেকগুলি কোয়ান্টাম সংখ্যা ব্যবহৃত হয় এবং এদের প্রকৃতি আমরা

একে একে বিশ্লেষণ করব। তরঙ্গ বলবিজ্ঞান প্রদত্ত প্রথম কোয়াণ্টাম সংখ্যাটিকে আমরা n নামে অভিহিত করব, n একটি অখণ্ড সংখ্যা, $n=1, 2, 3,\cdots\cdots$। এই নূতন n-এর প্রকৃতি বোর তত্ত্বে আবির্ভূত সংখ্যা n-এর তুলনায় পৃথক, তবে সমারফেল্ড তত্ত্বের প্রাথমিক কোয়াণ্টাম সংখ্যা n-এর সঙ্গে এর নিকট সাদৃশ্য আছে। এজন্য এটিকে আমরা প্রাথমিক কোয়াণ্টাম সংখ্যা নামেই উল্লেখ করব। এক্ষেত্রেও n একটি শক্তিস্তরের শক্তিকেই বিশেষভাবে নির্দেশ করে। কোন একটি শক্তিস্তরের মোট শক্তির পরিমাণ সাধারণতঃ সবচেয়ে বেশী নির্ভর করে n-এর উপর, অন্যান্য কোয়াণ্টাম সংখ্যাগুলির উপর মোট শক্তির নির্ভরশীলতা হাল্কা পরমাণুগুলিতে অপেক্ষাকৃত অনেক কম হয়। বর্ণালী বিশ্লেষণের ক্ষেত্রে এই কোয়াণ্টাম সংখ্যাটি কিভাবে ব্যবহৃত হয় সে-সম্বন্ধে একটু পরেই বিস্তৃতভাবে আলোচনা করা হবে।

পরবর্তী কোয়াণ্টাম সংখ্যাটি l নামে অভিহিত হয়ে থাকে, এটি পরমাণুস্থ ইলেকট্রনের কৌণিক ভরবেগ নির্দ্ধারণ করে এবং সেই অর্থে এটি সমারফেল্ডের কোয়াণ্টাম সংখ্যা n_ϕ-এর অনুরূপ। কোন ইলেকট্রনের কোয়াণ্টাম সংখ্যা l হলে তা বোঝায় যে, একটি নির্দ্দিষ্ট দিকে ইলেকট্রনটির চরম কৌণিক ভরবেগ $l\hbar$, l-কে বলা হয় কৌণিক ভরবেগ কোয়াণ্টাম সংখ্যা। কৌণিক ভরবেগের এই পরিমাণ কোয়াণ্টাম বলবিজ্ঞানের প্রয়োগ থেকেই পাওয়া সম্ভব। n-এর একটি বিশেষ পরিমাণের জন্য l-এর একাধিক পরিমাণের অস্তিত্ব সম্ভব, কোয়াণ্টাম বলবিজ্ঞানের সাহায্যে দেখান যায় যে n-এর একটি নির্দ্দিষ্ট পরিমাণের জন্য l নিম্নলিখিত যেকোন পরিমাণের হতে পারে

$$l=0, 1, 2,\cdots\cdots, n-1$$

l এবং সমারফেল্ডের কৌণিক কোয়াণ্টাম সংখ্যা n_ϕ-এর আচরণে অনেকটা মিল আছে, আবার মৌলিক পার্থক্যও আছে। যেমন $n_\phi=0$ সম্ভাবনাটি সমারফেল্ড তত্ত্বে বাতিল ক'রে দেওয়া হয়েছিল, কিন্তু কোয়াণ্টাম বলবিজ্ঞানের প্রয়োগের দ্বারা $l=0$ স্তরটির অস্তিত্ব প্রমাণ করা যায়। হাইড্রোজেনের ভূমিস্তরে কক্ষীয় ইলেকট্রনের প্রাথমিক কোয়াণ্টাম সংখ্যা $n=1$, সুতরাং এক্ষেত্রে $l=0$ অর্থাৎ হাইড্রোজেনের ভূমিস্তরে ইলেকট্রনের কোন কক্ষীয় কৌণিক ভরবেগ থাকতে পারে না। এই ঘটনাটি বোর তত্ত্বের সঙ্গে অসামঞ্জস্যপূর্ণ কারণ সেখানে ভূমিস্তরে নির্দ্দিষ্ট পরিমাণের কক্ষীয় কৌণিক ভরবেগের অস্তিত্ব স্বীকার ক'রে নেওয়া হয়েছে।

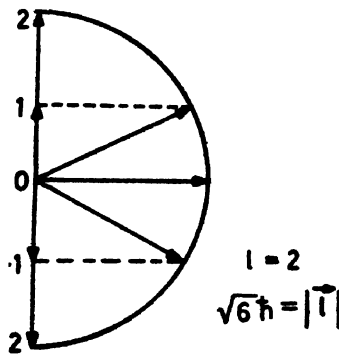
বোর-সমারফেল্ড তত্ত্ব থেকে দেখান সম্ভব যে ইলেকট্রনের কক্ষীয় আবর্তনের ফলে নির্দ্দিষ্ট পরিমাণের চৌম্বক ভ্রামক সৃষ্টি হবে, এই বিবরটি

আমরা হাইড্রোজেন বর্ণালীর বোর তত্ত্বের ক্ষেত্রে আলোচনা করেছি। এই চৌম্বক ভ্রামকের পরিমাণ সেক্ষেত্রে 4·29 সূত্রের দ্বারা প্রকাশিত। চৌম্বক ভ্রামক ভেক্টর ইলেকট্রন কক্ষপথের সমতলের সঙ্গে উলম্ব অবস্থায় থাকে এবং কৌণিক ভরবেগ ভেক্টরের বিপরীতমুখী হয় (যেহেতু ইলেকট্রনের আধান ঋণরাশি)। কোয়ান্টাম বলবিজ্ঞানে অবশ্য কক্ষীয় আবর্তনের ধারণা ব্যবহৃত হয় না, কিন্তু সেক্ষেত্রেও বলবিজ্ঞানের সমীকরণগুলির সাহায্যে দেখান যায় যে যেসব ইলেকট্রনের $l \neq 0$ তাদের জন্য নির্দিষ্ট পরিমাণ চৌম্বক ভ্রামকের উদ্ভব হয় যা বহিঃস্থ কোন চৌম্বকক্ষেত্রের সঙ্গে ক্রিয়া করতে পারে।

চৌম্বক ভ্রামক সমন্বিত পরমাণুকে চৌম্বকক্ষেত্রের ভিতর প্রবেশ করিয়ে দিলে পরমাণুটি কিছু চৌম্বক বিভবশক্তি অর্জন করবে। এই অবস্থায় পরমাণুর চৌম্বক ভ্রামক চেষ্টা করে বহিঃস্থ চৌম্বকক্ষেত্রের সঙ্গে সমান্তরাল-ভাবে নিজেকে উপস্থাপিত করতে। কিন্তু পরমাণুগুলির ভিতর ক্রমাগত পারস্পরিক সংঘর্ষ ঘটতে থাকায় অল্পসংখ্যক ক্ষেত্রেই সাধারণতঃ তা সম্ভব হয়, এক্ষেত্রে আশা করা যেতে পারে যে পরমাণুগুলির চৌম্বক ভ্রামক বহিঃস্থ ক্ষেত্রের সঙ্গে যেকোন কোণেই উপস্থাপিত থাকতে পারে। কিন্তু যেহেতু পৃথক পৃথক কোণে অবস্থানের জন্য চৌম্বক বিভবশক্তির পরিমাণও হবে পৃথক পৃথক, সুতরাং আমরা দেখি যে চৌম্বকক্ষেত্রে অবস্থিত পরমাণুর শক্তিস্তরগুলি সন্ততভাবে বিস্তারিত থাকতে পারে। চৌম্বকক্ষেত্রের ভিতর রাখা এইসব পরমাণুগুলি থেকে যে বর্ণালী সৃষ্টি হবে তাদের মধ্যেও স্পন্দনাঙ্কগুলি সন্ততভাবে বিস্তারিত থাকবে। কিন্তু জীম্যানের পরীক্ষা থেকে দেখা যায় যে, উত্তেজিত পরমাণুকে চৌম্বকক্ষেত্রে স্থাপিত করলে তাদের বর্ণালীর প্রতিটি রেখা কতগুলি নির্দিষ্টসংখ্যক পাশাপাশি রেখায় বিশ্লিষ্ট হয়ে যায়। এই ঘটনাটিকে বলা হয় জীম্যান প্রক্রিয়া। জীম্যান প্রক্রিয়া থেকে স্পষ্ট প্রমাণিত হয় যে পরমাণুর চৌম্বক ভ্রামক (এবং তাথেকে পরমাণুর কৌণিক ভরবেগ) বহিঃস্থ চৌম্বকক্ষেত্রের সঙ্গে যেকোন কোণে অবস্থান করতে পারে না, এদের পক্ষে শুধুমাত্র নির্দিষ্ট কয়েকটি কোণেই অবস্থান সম্ভব। এইহেতু পরমাণুর এক একটি শক্তিস্তর চৌম্বকক্ষেত্রের ভিতর কতগুলি নির্দিষ্ট-সংখ্যক শক্তিস্তরে বিভক্ত হয়ে যায়, এবং যেহেতু চৌম্বক বিভবশক্তির পরিমাণ সাধারণতঃ অল্প হয়, এই শক্তিস্তরগুলি পরস্পরের সন্নিহিত থাকে। কোয়ান্টাম বলবিজ্ঞানের দ্বারাও সহজেই প্রমাণ করা সম্ভব যে প্রত্যেক l-এর জন্য বহিঃস্থ চৌম্বকক্ষেত্রে পরমাণুর কক্ষীয় কৌণিক ভরবেগ মোট $2l+1$ সংখ্যক বিভিন্ন কোণে উপস্থাপিত থাকতে পারে। 5·1 চিত্রে $l=2$-এর জন্য

কক্ষীয় কৌণিক ভরবেগের বিভিন্ন সম্ভাব্য অবস্থান দেখান হয়েছে। তীরচিহ্নিত রেখার সাহায্যে কৌণিক ভরবেগ ভেক্টরকে বোঝান হয়েছে এবং এর বিভিন্ন অবস্থানের জন্য যেকোন একটি নির্দিষ্ট দিক বরাবর এর লম্ব অভিক্ষেপগুলিও দেখান হয়েছে। যেহেতু $l=2$, কৌণিক ভরবেগের মোট পাঁচটি বিভিন্ন অবস্থান সম্ভব।

এই ঘটনাটিকে বলা হয় দেশ কোয়াণ্টীভবন, কোয়াণ্টাম বলবিজ্ঞানে এটি খুব স্বাভাবিকভাবে আবির্ভূত হয়। দেশ কোয়াণ্টীভবন বোঝাবার জন্য একটি নূতন কোয়াণ্টাম সংখ্যা প্রবর্তন করা হয়েছে, এর নাম চৌম্বক কোয়াণ্টাম সংখ্যা m_l, প্রত্যেক l-এর জন্য $2l+1$ বিভিন্ন m_l-এর পরিমাণ থাকতে পারে। l-এর কোন নির্দিষ্ট পরিমাণের জন্য m_l-এর পরিমাণ $-l$ থেকে শুরু করে $+l$ পর্য্যন্ত বিস্তৃত থাকে

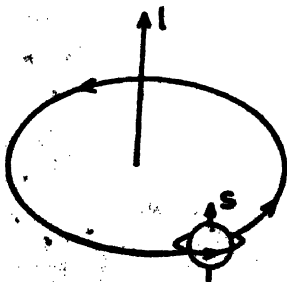
$$m_l=-l,\ -l+1,\ -l+2,\cdots\cdots,\ l-1,\ l$$

চিত্র 5·1

দুটি পাশাপাশি অবস্থিত m_l-এর পরিমাণের পার্থক্য এক। চৌম্বকক্ষেত্রের ভিতর বিভিন্ন কৌণিক অবস্থানের জন্য শক্তির পরিমাণ পৃথক হয় এবং শক্তিস্তরের এই বিভাজন বর্ণালীর ভিতর সহজেই দৃষ্ট হয়। ক্ষেত্রবিহীন অবস্থায় প্রত্যেক কৌণিক অবস্থানের জন্যই শক্তির পরিমাণ অভিন্ন এজন্য বর্ণালীর কোন বিভাজন ঘটে না। একটি সহজ গঠনকল্প গ্রহণ ক'রে কোয়াণ্টাম বলবিজ্ঞান প্রদত্ত ফলাফলগুলি সুচারুরূপে বিবৃত করা যায়, একে বলা হয় ভেক্টর গঠনকল্প। এক্ষেত্রে কৌণিক ভরবেগ ভেক্টরটির বিশুদ্ধ পরিমিতি ধরা হয়

$$|\vec{l}|=\sqrt{l(l+1)}\hbar$$

কিন্তু যেকোন একটি নির্দিষ্ট দিকে $\bar{l}$ ভেক্টরের চরম অভিক্ষেপ হ'ল $l\hbar$। তবে সাধারণতঃ এই চরম অভিক্ষেপ $l\hbar$-কেই কক্ষীয় কৌণিক ভরবেগ আখ্যা দেওয়া হয়ে থাকে। অনেক সময় $\hbar$ রাশিটিও উল্লেখ করা হয় না, কক্ষীয় কৌণিক ভরবেগ l, এই কথাটিতে বোঝায় একটি কৌণিক ভরবেগ যার চরম অভিক্ষেপের পরিমাণ $l\hbar$। 5·1 চিত্রে কৌণিক ভরবেগ ভেক্টরের পরিমিতি $\sqrt{6}\hbar$ ($l=2$) এবং নির্দিষ্ট একটি দিকে এর অভিক্ষেপগুলি হয় যথাক্রমে $2\hbar$, $1\hbar$, 0, $-1\hbar$, $-2\hbar$। এইসব তথ্যগুলি বর্ণালীর বিভিন্ন রেখার উপর জীম্যান প্রক্রিয়ার বিশ্লেষণ থেকে যথার্থ প্রতিপন্ন হয়েছে। কোয়াণ্টাম বলবিজ্ঞানে কৌণিক ভরবেগের এই প্রকৃতি সনাতন পদার্থবিদ্যার নীতির সঙ্গে সামঞ্জস্যবিহীন, সেখানে কোন একটি দিক বরাবর কৌণিক ভরবেগ ভেক্টরের অভিক্ষেপগুলির পরিমাণ সন্ততভাবে বিতরিত থাকতে পারে।

এ পর্যন্ত আমরা তিনটি কোয়াণ্টাম সংখ্যার বিবরণ দিলাম, কিন্তু দেখা যায় যে বর্ণালীর পূর্ণ বিবরণ দেবার পক্ষে এরা যথেষ্ট নয়, বর্ণালীর মধ্যে কিছু কিছু জটিলতা আছে এই তিনটি কোয়াণ্টাম সংখ্যা ব্যবহার ক'রেও যাদের ব্যাখ্যা দেওয়া যায় না। এইরকম একটি জটিলতা দৃষ্ট হয় ক্ষার ধাতুর বর্ণালীর রেখাগুলির সূক্ষ্ম বিভাজনের ক্ষেত্রে। অধিক বিশ্লিষ্টকরণ ক্ষমতাসম্পন্ন যন্ত্র ব্যবহার ক'রে লক্ষ্য করা গিয়াছে যে ক্ষার বর্ণালীর প্রতিটি রেখাই আসলে পরস্পর খুবই সন্নিহিত কতগুলি রেখার সমষ্টি এবং কোনরকম বহিঃস্থ চৌম্বকক্ষেত্রের অস্তিত্ব ব্যতিরেকেই এই বিভাজন লক্ষ্য করা যায়।

উলেনবেক্ এবং গাউডস্মিড (Uhlenbeck & Goudsmidt) প্রথম প্রস্তাব করেন যে এই সূক্ষ্ম বিভাজনের ব্যাখ্যা সম্ভব যদি ধ'রে নেওয়া হয় যে, ইলেকট্রনের কক্ষপথে আবর্তনজনিত কৌণিক ভরবেগ ছাড়াও এক নিজস্ব ঘূর্ণন-জনিত কৌণিক ভরবেগ রয়েছে, ঠিক যেমন পৃথিবীর সূর্য্যের চারপাশে আবর্তন ছাড়াও নিজ অক্ষের চারপাশে ঘূর্ণনজনিত আহ্নিক-গতি রয়েছে (চিত্র 5·2)। ইলেকট্রনের এই নিজস্ব ঘূর্ণনজাত কৌণিক ভরবেগকে বলা হয় এর ঘূর্ণ যার সম্বন্ধে পূর্বেই আমরা কিছু আলোচনা করেছি। পরমাণুর ভিতর ইলেকট্রনের ঘূর্ণজনিত এবং কক্ষীয় আবর্তনজনিত দুই রকমের চৌম্বক ভ্রামক পরস্পরের উপর ক্রিয়া ক'রে

চিত্র 5·2

নূতন নূতন শক্তিস্তরের জন্ম দেয়, অর্থাৎ ইলেকট্রনের ঘূর্ণি না থাকলে যে শক্তিস্তরটি পাওয়া যেত, ঘূর্ণি থাকার ফলে তা একাধিক শক্তিস্তরে বিভক্ত হয়ে যায়। এইভাবেই বর্ণালীর ভিতর সূক্ষ্ম বিভাজনের উদ্ভব হয়। ইলেকট্রনের ঘূর্ণিরও দেশ কোয়াণ্টীভবন ঘটে এবং যেকোন নির্দিষ্ট একটি দিকে এই ঘূর্ণির চরম অভিক্ষেপ হ'ল $\frac{1}{2}\hbar$। ইলেকট্রনের ঘূর্ণি s নামে আখ্যাত হয়ে থাকে এবং কোয়াণ্টাম বলবিজ্ঞান প্রদত্ত ফলাফলগুলি খুব সহজে বিবৃত করা যায় যদি ধরে নেওয়া যায় যে ঘূর্ণি ভেক্টরের পরিমিতি হবে $\sqrt{s(s+1)}\hbar$, যেখানে $s=\frac{1}{2}$। এভাবেই ইলেকট্রন ঘূর্ণিকে ভেক্টর গঠনকল্পের ভিতর নির্দেশিত করা হয়। কোন নির্দিষ্ট চৌম্বকক্ষেত্রের দিকে এই ঘূর্ণির দুটিমাত্র অভিক্ষেপ থাকতে পারে, $\frac{1}{2}\hbar$ এবং $-\frac{1}{2}\hbar$, এজন্য ইলেকট্রনের ঘূর্ণিজনিত চৌম্বক কোয়াণ্টাম সংখ্যা দুটি, $m_s=\frac{1}{2}, -\frac{1}{2}$। কোয়াণ্টাম বলবিজ্ঞানে ডির‍্যাক-প্রদত্ত আপেক্ষিকতাভিত্তিক সমীকরণ থেকে ইলেকট্রনের এইসব ধর্মাবলী সমস্তই উদ্ধার করা সম্ভব। ইলেকট্রন ঘূর্ণির প্রয়োগের দ্বারা ক্ষার বর্ণালীর সূক্ষ্মবিভাজন নিখুঁতভাবে বিশ্লেষণ করা সম্ভব হয়েছে।

সুতরাং পরমাণুর শক্তিস্তরগুলি নির্দ্ধারণ করতে হলে আমাদের চারটি কোয়াণ্টাম সংখ্যার প্রয়োজন অনুভূত হচ্ছে। এই সংখ্যাগুলিকে এদের সংজ্ঞা অনুযায়ী পাশাপাশি সাজিয়ে নিম্নলিখিতভাবে লেখা যায়

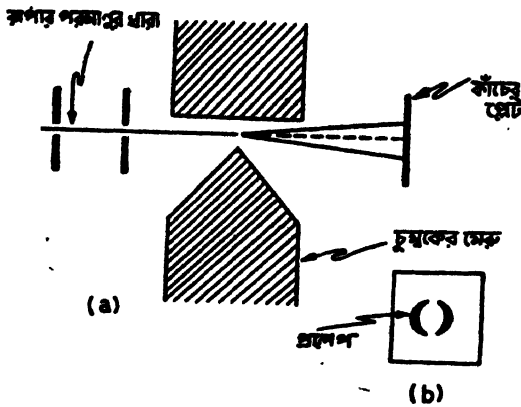
$$
\begin{aligned}
n &= 1, 2, 3, \cdots\cdots \\
l &= 0, 1, 2, 3, \cdots\cdots n-1 \\
m_l &= -l, -l+1, \cdots\cdots l-1, l \\
m_s &= \tfrac{1}{2}, -\tfrac{1}{2}
\end{aligned}
\qquad 5{\cdot}1
$$

এদের ব্যবহারের মূল নীতি হচ্ছে এই যে, পরমাণুস্থ ইলেকট্রনের শক্তি-স্তরগুলি এই চারটি কোয়াণ্টাম সংখ্যার সাহায্যে ব্যাখ্যা করা সম্ভব। প্রত্যেকটি ইলেকট্রনের এইরকম চারটি ক'রে কোয়াণ্টাম সংখ্যা থাকবে এবং এদের বিভিন্ন সমাবেশের জন্য (এক সঙ্গে চারটি ক'রে) আমরা পরমাণুর এক একটি শক্তিস্তর পাব। উদাহরণস্বরূপ, যেখানে ইলেকট্রনের অপর সব কোয়াণ্টাম সংখ্যাগুলি পরস্পর সমান শুধু m_s-এর পরিমাণ একক্ষেত্রে $\frac{1}{2}$ এবং অপর ক্ষেত্রে $-\frac{1}{2}$, সেরকম পরিস্থিতিতে পরমাণুর মধ্যে দুটি পৃথক শক্তিস্তরের সৃষ্টি হবে। বর্ণালীর নানারকম পরিবর্ত্তন ঘটে যদি বিকিরণশীল পরমাণুকে বৈদ্যুতিক অথবা চৌম্বকক্ষেত্রের ভিতর রাখা যায়, কিন্তু ঐসব ক্ষেত্রেও ইলেকট্রনের উপর্য্যুক্ত চারটি কোয়াণ্টাম সংখ্যাই যাবতীয় নূতনত্ব ব্যাখ্যা করতে সক্ষম। তবে এখানে মন্তব্য করা বাহুল্য যে বর্ণালীর ভিতর আরও

এক রকমের বিভাজন লক্ষ্য করা যায় যাকে বলা হয় অতি সূক্ষ্ম বিভাজন, এই বিভাজনের পরিমাণ সূক্ষ্ম বিভাজনের তুলনায় বহুগুণ কম এবং এজন্য এর পর্যবেক্ষণও সেই অনুপাতে কঠিন। পরমাণু কেন্দ্রীনেরও নির্দিষ্ট পরিমাণের ঘূর্ণ এবং চৌম্বক ভ্রামক থাকে এবং এর প্রভাবেই অতি সূক্ষ্ম বিভাজনের উদ্ভব হয়। এক্ষেত্রে অবশ্য পরমাণু কেন্দ্রীনের ঘূর্ণির জন্য আরও একটি কোয়ান্টাম সংখ্যার প্রয়োজন হয়। তবে এই বিভাজনের পরিমাণ খুবই সামান্য এবং বর্তমান আলোচনায় আমরা এর বিশদ বিবরণ দিতে বিরত থাকব।

স্টার্ন-গারলাখ্ পরীক্ষা (Stern-Gerlach experiment)

পরমাণুকে চৌম্বকক্ষেত্রের ভিতর রাখলে এর চৌম্বক ভ্রামক বহিঃস্থ ক্ষেত্রের সঙ্গে শুধু কতগুলি নির্দিষ্ট কোণে অবস্থান করতে পারে, এর নাম দেশ কোয়ান্টীভবন, পূর্ববর্তী পরিচ্ছেদে এর উল্লেখ করা হয়েছে। পরীক্ষাগারে সরাসরি পরীক্ষা ক'রে এই দেশ কোয়ান্টীভবন প্রক্রিয়ার বাস্তবতা প্রমাণ করা সম্ভব হয়েছে, বিজ্ঞানীদ্বয় স্টার্ন এবং গারলাখ্ এই পরীক্ষাটি প্রথম করেন। 5·3 চিত্রে পরীক্ষাটির সংক্ষিপ্ত আয়োজন দেখান হয়েছে। পরীক্ষার মুখ্য সামগ্রী হচ্ছে একটি চুম্বক যার বিপরীত মেরুদ্বয় পরস্পরের মুখোমুখি থাকে এবং এদের ভিতর তীব্র অসমমাত্র চৌম্বকক্ষেত্র সৃষ্টি ক'রে রাখা হয়, অর্থাৎ দুই মেরুর ফাঁকের মধ্যে যে চৌম্বকক্ষেত্র থাকে তার তীব্রতা অল্প দূরত্বের মধ্যেই অত্যধিক পরিমাণে পরিবর্তিত হয়। এরকম অসমমাত্র ক্ষেত্র সৃষ্টি করা যায় চুম্বকের একটি মেরুকে খুব ছুঁচালোভাবে তৈরী ক'রে যেমন 5·3 চিত্রে দেখা যাচ্ছে, চিত্রে অবশ্য সমগ্র চুম্বকটির প্রস্থচ্ছেদ শুধু দেখান হয়েছে। একটি কক্ষের ভিতর (চিত্রে দেখান হয়নি) কিছু রূপার টুকরোকে অতি তীব্রভাবে উত্তপ্ত ক'রে তার ভিতর থেকে পরমাণুগুলি নির্গত করান হয়। এই পরমাণুপ্রবাহকে একটি ফাঁকের ভিতর দিয়ে চালিত ক'রে একটি অত্যন্ত সরু প্রবাহধারায় পরিণত করা হয়, তারপর এই ধারাটিকে চৌম্বকক্ষেত্রের সবচেয়ে অসমমাত্র অংশের ভিতর দিয়ে চালিত ক'রে দেওয়া হয়। ক্ষেত্রের ভিতর থেকে নির্গত হয়ে এসে পরমাণুগুলি একটি কাঁচের পর্দার উপর গিয়ে পড়ে এবং পর্দার গায়ে লেগে থাকে। সমস্ত আয়োজনটিকেই অবশ্য একটি অত্যধিক শূন্য কক্ষের ভিতর রাখতে হয়। যদি বিদ্যুৎপ্রবাহ বন্ধ ক'রে দিয়ে চৌম্বকক্ষেত্রের তীব্রতার পরিমাণ সম্পূর্ণ শূন্য ক'রে ফেলা হয় তবে দেখা যাবে যে, পরমাণুগুলি পর্দার উপর একটি অঞ্চলে এসে জড়ো হচ্ছে যার আয়তন প্রবাহধারাটির প্রস্থচ্ছেদের মোটামুটি সমান। কিন্তু

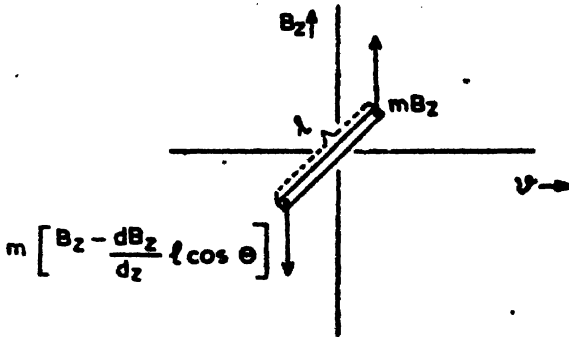
চৌম্বকক্ষেত্র পুরোমাত্রায় বজায় রাখলে দেখা যায় যে, প্রবাহধারাটি দুটি সম্পূর্ণ পৃথক অংশে বিভক্ত হয়ে যায় এবং কাঁচের পর্দার উপর দুটি পরস্পর বিচ্ছিন্ন পরমাণুর প্রলেপ জমে ওঠে ঠিক যেমন 5·3(b) চিত্রে দেখান হয়েছে। নানা পরীক্ষায় প্রমাণ হয় যে রূপার পরমাণুর কৌণিক ভরবেগের পরিমাণ ½ℏ। এই পরমাণুতে 47টি ইলেকট্রন আছে কিন্তু এদের মধ্যে একটি ছাড়া আর বাকী সবগুলি ইলেকট্রন এমনভাবে থাকে যে এদের সম্মিলিত কৌণিক ভরবেগ ও চৌম্বক ভ্রামকের পরিমাণ শূন্য, সুতরাং এই পরমাণুর

চিত্র 5·3

(a) স্টার্ন-গারলাখ্‌ পরীক্ষার আয়োজন।

(b) কাঁচের প্লেটের উপর জমে ওঠা রূপার পরমাণুর দুটি প্রলেপ।

চৌম্বক ভ্রামক ও কৌণিক ভরবেগের জন্য দায়ী শুধু ঐ 47-তম ইলেকট্রনটি (সর্বশেষ পরিচ্ছেদ এবং 5·3 সারণী দ্রষ্টব্য)। রূপার পরমাণুর ভূমিস্তরে, এই ইলেকট্রনটির কক্ষীয় কৌণিক ভরবেগ শূন্য এজন্য মোট কৌণিক ভরবেগ একটি ইলেকট্রনের ঘূর্ণির সমান অর্থাৎ ½ℏ। সুতরাং স্টার্ন-গারলাখ্‌ পরীক্ষায় যে চৌম্বক ভ্রামকের পরিমাণ নির্দ্ধারিত হয় তা হ'ল আসলে ইলেকট্রনের চৌম্বক ভ্রামক। এই পরীক্ষায় দেশ কোয়ান্টীভবনের প্রকল্পটির যথার্থতা প্রমাণিত হয়, কারণ যদি রূপার পরমাণুর চৌম্বক ভ্রামক চৌম্বকক্ষেত্রের সঙ্গে যেকোন কোণে অবস্থান ক'রে থাকতে পারত তবে পরমাণুর ধারাটি উভয় দিকেই সমভাবে ছড়িয়ে গিয়ে পর্দার উপর একটি বৃহদাকার সন্তত প্রলেপের সৃষ্টি করত। কিন্তু তা না হয়ে যেহেতু দুটি মাত্র পৃথক প্রলেপের সৃষ্টি হয় তা থেকে স্পষ্ট বোঝা যায় যে চৌম্বক ভ্রামক বহিঃস্থ চৌম্বকক্ষেত্রের সঙ্গে দুটি মাত্র কোণে (0° এবং 180°) অবস্থান করতে পারে। সুতরাং আমরা

পূর্ববর্তী পরিচ্ছেদে ইলেকট্রন ঘূর্ণির যে প্রকৃতি প্রস্তাব করেছিলাম তার সঙ্গে এই পরীক্ষার ফলাফল সম্পূর্ণ সামঞ্জস্যপূর্ণ।

কিভাবে উপরোক্ত চৌম্বকক্ষেত্রের ভিতর দিয়ে চলার সময় পারমাণবিক চুম্বকগুলি বিক্ষিপ্ত হয় তা খুব সহজেই দেখান যায়। মনে করা যাক, চৌম্বকক্ষেত্রটি শুধু Z-অক্ষ বরাবর বর্তমান আছে (5·4 চিত্র), অর্থাৎ $B_x = B_y = 0$,

চিত্র 5·4

এছাড়া চৌম্বকক্ষেত্রটির অসমমাত্রতাও শুধু Z-অক্ষ বরাবর বজায় থাকে। ধরা যাক, এরকম অসমমাত্র ক্ষেত্রের ভিতর Z-অক্ষের সঙ্গে θ-কোণে একটি ক্ষুদ্র চুম্বক রয়েছে যার অক্ষদণ্ডের দৈর্ঘ্য l এবং মেরু তেজ (pole strength) m। v, চৌম্বকক্ষেত্রের সঙ্গে লম্বভাবে ঐ ক্ষুদ্র চুম্বকটির গতিবেগ। Z দিক বরাবর চৌম্বকক্ষেত্রের পরিবর্তনের হার dB_z/dz, চুম্বকের একটি মেরুতে যদি চৌম্বকক্ষেত্রের তীব্রতা হয় B_z, তবে অপর মেরুতে তীব্রতা হবে $B_z - dB_z/dz \; l \cos\theta$, সুতরাং পরমাণুটির উপর মোট চৌম্বক বলের পরিমাণ হবে

$$F = mB_z \cdot m\left[B_z - \frac{dB_z}{dz} l \cos\theta\right.$$

$$= ml \cos\theta \frac{dB_z}{dz} = \mu \cos\theta \frac{dB_z}{dz}$$

এখানে μ ঐ ক্ষুদ্র চুম্বকটির অর্থাৎ এক্ষেত্রে পরমাণুর চৌম্বক ভ্রামক। দুটি সমান মেরুতেজ সম্পন্ন কিন্তু বিপরীতমুখী ভ্রামকবিশিষ্ট চুম্বকের উপর এই বলের ক্রিয়া সমান, কিন্তু বিপরীতমুখী হবে। অপার পরমাণুর প্রবাহধারা প্রাথমিক গতির দিক থেকে সমদূরবর্তী দুটি অংশে বিভক্ত হয়ে যায়, এথেকে প্রমাণ হয় যে ঐ প্রবাহধারার ভিতর শুধু পরস্পর বিপরীতমুখী চৌম্বক ভ্রামকের

অস্তিত্ব আছে। অসমমাত্র ক্ষেত্র না হলে কিন্তু পরমাণুগুলিকে বিচ্যুত করা সম্ভব নয়, কারণ সমমাত্র ক্ষেত্রে মেরুদ্বয়ের উপর একই পরিমাণের বল ক্রিয়া করে যায় যায়। পারমাণবিক চুম্বকটির মধ্যে শুধু একটি ভ্রামকের সৃষ্টি হওয়া সম্ভব। রূপার পরমাণুর ভর এবং মোট বিচ্যুতির পরিমাণের সাহায্যে পরীক্ষার আয়োজনের জ্যামিতির জ্ঞান থেকে বল F-এর পরিমাণ জানা যায়, তাছাড়া চৌম্বকক্ষেত্রের অসমমাত্রতা dB_z/dz খুব সূক্ষ্মভাবে পরিমাপ করা সম্ভব ; এইসব পরিমাপের সাহায্য নিয়ে μ-এর পরিমাণ মাপা যায়। এভাবে রূপার পরমাণুতে আবদ্ধ ইলেকট্রনের চৌম্বক ভ্রামকের যে পরিমাণ পাওয়া গেছে তা হ'ল এক বোর ভ্রামকের সমান। পরবর্তী কালে স্টার্ন-গারলাখ্ পরীক্ষা হাইড্রোজেন পরমাণু নিয়েও করা হয়েছে এবং দেখা গেছে যে সেক্ষেত্রেও প্রবাহধারাটি শুধু দুটি অংশেই বিভক্ত হয়ে যায়। হাইড্রোজেনেও ভূমিস্তরে কক্ষীয় কৌণিক ভরবেগ শূন্য সুতরাং এভাবে যে চৌম্বক ভ্রামক নির্দ্ধারিত হয় তা হ'ল ইলেকট্রনের ঘূর্ণিজনিত চৌম্বক ভ্রামক। লক্ষণীয় যে, বোর তত্ত্বের আলোচনায় আমরা দেখেছি যে ইলেকট্রনের কক্ষীয় কৌণিক ভরবেগ $1\hbar$ হলে তার ফলে যে চৌম্বক ভ্রামকের সৃষ্টি হয় তার পরিমাণ এক বোর ভ্রামক, কিন্তু ইলেকট্রন ঘূর্ণির ক্ষেত্রে, যদিও এর পরিমাণ $\frac{1}{2}\hbar$, এর দ্বারা সৃষ্ট চৌম্বক ভ্রামকের পরিমাণ কিন্তু ঠিক এক বোর ভ্রামক।

ক্ষারধাতুর বর্ণালী (Alkali Spectra)

লিথিয়াম, সোডিয়াম, পটাশিয়াম ইত্যাদি মৌলগুলিকে বলা হয় ক্ষার ধাতু, বর্তমান পরিচ্ছেদে আমরা এদের বর্ণালীর প্রকৃতি সম্বন্ধে কিছু আলোচনা করব। এই ধাতুগুলিকে বেছে নেওয়া হয়েছে তার কারণ এদের বর্ণালী অনেক ক্ষেত্রে হাইড্রোজেন বর্ণালীর অনুরূপ, এবং হাইড্রোজেনের সঙ্গে তুলনা ক'রে এদের বর্ণালী সৃষ্টির পদ্ধতি সহজেই অনুধাবন করা যায়। ক্ষারধাতুগুলি পর্য্যায় সারণীর প্রথম বিভাগে থাকে, রাসায়নিক বিক্রিয়ায় এদের প্রত্যেকের যোজ্যতা এক, এদের পরমাণুর ভিতর যদিও একাধিক ইলেকট্রন বর্তমান কিন্তু বর্ণালী সৃষ্টির ব্যাপারে শুধু একটিমাত্র ইলেকট্রনই অংশগ্রহণ ক'রে থাকে। উদাহরণস্বরূপ সোডিয়ামের কথা ধরা যাক, এর পারমাণবিক সংখ্যা 11 অর্থাৎ সোডিয়াম পরমাণুতে 11টি কক্ষীয় ইলেকট্রনের অস্তিত্ব আছে। এই ইলেকট্রন কক্ষগুলি স্তরে স্তরে সজ্জিত থাকে, যেসব ইলেকট্রনের কোয়াণ্টাম সংখ্যা $n=1$ সেগুলি কেন্দ্রীনের সবচেয়ে নিকটে থাকে, $n=2$ ইলেকট্রনগুলি তাদের চেয়ে একটু দূরে থাকে, ইত্যাদি। প্রথম দশটি ইলেকট্রন পরমাণু কেন্দ্রীনের আকর্ষণে অত্যন্ত সুসংবদ্ধ অবস্থায় থেকে কক্ষগুলি পরিপূর্ণ

ইলেকট্রন 'সেলের' সৃষ্টি করে। এই ইলেকট্রনগুলিকে বহিঃশক্তির প্রভাবে সহজে উত্তেজিত করা যায় না, এজন্য বর্ণালী সৃষ্টির ব্যাপারে এরা সাধারণতঃ কোন অংশগ্রহণ করে না। অবশিষ্ট একাদশতম ইলেকট্রনটি, যেটি সবার বাইরে থাকে, সেইটিই উত্তেজিত হয়ে আলোক বর্ণালীর ভিতর আবির্ভূত স্পন্দনাঙ্কগুলির জন্ম দিয়ে থাকে। পরিপূর্ণ সেলের ইলেকট্রনগুলি কেন্দ্রীনের আধানকে আংশিক ঢেকে রাখে, এজন্য সবচেয়ে বহিঃস্থ ইলেকট্রনটি কেন্দ্রীনের যে আধানের সম্মুখীন হয় তার পরিমাণ একটি প্রোটনের আধানের পরিমাণের সমান, এই কারণে বহিঃস্থ ইলেকট্রনটির গতি অনেকটা ঠিক হাইড্রোজেন কেন্দ্রীনের চারপাশে ইলেকট্রনের গতির মত। অন্যান্য সমস্ত ক্ষার ধাতুর ক্ষেত্রেও একই অবস্থার সৃষ্টি হয়, প্রতিক্ষেত্রেই কেন্দ্রীনের নিকটবর্ত্তী কতগুলি নিষ্ক্রিয় পরিপূর্ণ ইলেকট্রন সেল থাকে এবং এদের বাইরে থাকে বর্ণালী সৃষ্টিকারী একটিমাত্র ইলেকট্রন, এথেকে আমরা বুঝতে পারি কেন ক্ষার ধাতুর বর্ণালী হাইড্রোজেন বর্ণালীর অনুরূপ হয়ে থাকে।

হাইড্রোজেন বর্ণালীর মত ক্ষার বর্ণালীতেও কতগুলি শ্রেণী দেখা যায়, চারটি উল্লেখযোগ্য শ্রেণী দৃষ্ট হয় যেগুলি হাইড্রোজেনের শ্রেণীগুলির অনুরূপ। বামার সূত্রের অনুরূপ ধরণের কতগুলি সহজ সূত্রের সাহায্যে এইসব শ্রেণীর তরঙ্গদৈর্ঘ্যগুলি প্রকাশ করা যায়, কিন্তু তাতে কতগুলি অজ্ঞাতরাশির উদ্ভব হয়। পরীক্ষালব্ধ তরঙ্গদৈর্ঘ্যের সঙ্গে তুলনা ক'রে এই অজ্ঞাতরাশিগুলির পরিমাণ নির্ণয় করা সম্ভব। সুতরাং এইদিক থেকে হাইড্রোজেন বর্ণালীর সঙ্গে ক্ষার বর্ণালীর কিছু অমিল রয়েছে। প্রত্যেক প্রকার ক্ষার ধাতুর বর্ণালীর প্রকৃতি একই রকম, প্রত্যেকটির মধ্যেই চারটি মুখ্য শ্রেণীর অস্তিত্ব দেখতে পাওয়া যায়, এগুলির নাম যথাক্রমে প্রধান, তীক্ষ্ণ, আবছা এবং মৌলিক শ্রেণী। বিভিন্ন শ্রেণীগুলির মধ্যে পার্থক্য এদের নামকরণের মধ্যেই প্রকাশিত হয়েছে; প্রধান শ্রেণীর ঔজ্জ্বল্য সবচেয়ে বেশী, তীক্ষ্ণ শ্রেণীর রেখাগুলি খুবই তীক্ষ্ণ এবং সরু, আবছা শ্রেণীর রেখাগুলি অপেক্ষাকৃত আবছা এবং মোটা দেখায়। পূর্ব্বের পরিচ্ছেদে যে চারটি কোয়াণ্টাম সংখ্যার পরিচিতি দেওয়া হয়েছে তাদের সাহায্যে ক্ষার বর্ণালীর নির্ভুল বর্ণনা দেওয়া সম্ভব যদিও শক্তিস্তরগুলি পরিমাণগতভাবে নির্ভুলরূপে গণনা করতে হলে কোয়াণ্টাম বলবিজ্ঞানের নানারকম জটিল পদ্ধতি প্রয়োগ করতে হয়। পরে আমরা দেখতে পাব যে ভূমিস্তরে সোডিয়াম পরমাণুর সবার বাইরের যে ইলেকট্রনটি বর্ণালী সৃষ্টির জন্য দায়ী তার প্রাথমিক কোয়াণ্টাম সংখ্যা $n=3$। শুধু প্রাথমিক কোয়াণ্টাম সংখ্যার ভিত্তিতে সোডিয়ামের পরীক্ষালব্ধ বর্ণালীর বিভিন্ন শ্রেণীগুলিকে নিম্নলিখিত সূত্রগুলির সাহায্যে প্রকাশ করা যায়।

প্রাথমিক শ্রেণী : $\frac{1}{\lambda}=R\left[\frac{1}{(3-\delta_s)^2}-\frac{1}{(n-\delta_p)^2}\right]$;

$n=3, 4, 5, \cdots\cdots$

তীক্ষ্ণ শ্রেণী : $\frac{1}{\lambda}=R\left[\frac{1}{(3-\delta_p)^2}-\frac{1}{(n-\delta_s)^2}\right]$;

$n=4, 5, 6, \cdots\cdots\cdots$

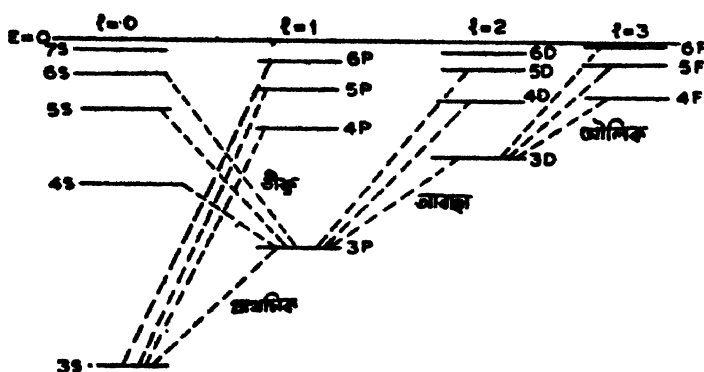
আবছা শ্রেণী : $\frac{1}{\lambda}=R\left[\frac{1}{(3-\delta_p)^2}-\frac{1}{(n-\delta_d)^2}\right]$;

$n=3, 4, 5, \cdots\cdots$

মৌলিক শ্রেণী : $\frac{1}{\lambda}=R\left[\frac{1}{(3-\delta_d)^2}-\frac{1}{(n-\delta_f)^2}\right]$;

$n=4, 5, 6, \cdots\cdots \quad 5{\cdot}3$

এখানে R হ'ল রিড্‌বার্গ ধ্রুবক। এই সূত্রগুলিতে n প্রাথমিক কোয়াণ্টাম সংখ্যা নির্দেশ করে ; δ_s, δ_p, δ_d, δ_f, ইত্যাদি রাশিগুলি কতগুলি অজ্ঞাত রাশি যাদের পরিমাণ শুধু পরীক্ষালব্ধ ফলাফলের সঙ্গে তুলনা ক'রেই জানা সম্ভব। লক্ষণীয় যে এইসব অজ্ঞাত রাশিগুলির আবির্ভাব না ঘটলে উপরিলিখিত সূত্রগুলি হাইড্রোজেন শ্রেণীগুলির সূত্রের মতই দেখাত, এদের আবির্ভাবেই হাইড্রোজেন বর্ণালীর সঙ্গে ক্ষার বর্ণালীর স্বতন্ত্রতা সৃষ্টি হয়। এই সূত্রগুলিতে প্রাথমিক কোয়াণ্টাম সংখ্যা n-এর যে ন্যূনতম মান আবির্ভূত হয় তা হ'ল $n=3$, 5·5 চিত্রে সোডিয়ামের বিভিন্ন শ্রেণীগুলি কিভাবে সৃষ্টি হয় তা দেখান হয়েছে, এখানে 3, 4, 5 ইত্যাদি প্রাথমিক কোয়াণ্টাম সংখ্যা n-এর বিভিন্ন পরিমাণ, S, P, D ইত্যাদি অক্ষরগুলি সমগ্র পরমাণুটির বিভিন্ন মোট কক্ষীয় কৌণিক ভরবেগ অবস্থাকে নির্দেশ করে। সাধারণভাবে, বড় অক্ষর 'L' দ্বারা পরমাণুর একটি শক্তিস্তরের মোট কক্ষীয় কৌণিক ভরবেগ কোয়াণ্টাম সংখ্যাকে নির্দেশ করা হয় ; S বলতে বোঝায় $L=0$, P হ'ল $L=1$, ইত্যাদি। 5·5 চিত্রটিকে বলা হয় সোডিয়ামের শক্তিস্তর চিত্র, এখানে প্রতিটি সমান্তরাল সরলরেখা নির্দেশ করে সোডিয়াম পরমাণুর এক একটি পৃথক শক্তিস্তর। অন্যান্য ক্ষারধাতুর ক্ষেত্রেও শক্তিস্তর চিত্রটি একই রকম; প্রত্যেক ক্ষেত্রেই উপরোক্ত চারটি শ্রেণী একই পদ্ধতিতে সৃষ্টি হয়। বামার সূত্রের মত 5·3 সূত্রগুলিতেও ডানদিকের প্রথম রাশিটি একটি ধ্রুবক, দ্বিতীয় রাশিটি n-এর উপর নির্ভরশীল। n যত বৃদ্ধি পেতে থাকে রেখাগুলির স্পন্দনাঙ্কও তত অধিক হতে থাকে এবং সেই সঙ্গে পাশাপাশি অবস্থিত

রেখাগুলির ভিতর তরঙ্গদৈর্ঘ্যের ব্যবধান কমে আসতে থাকে। n অসীমের দিকে যেতে থাকলে তরঙ্গসংখ্যা $1/\lambda$ এর পরিমাণ হয় ডানদিকের প্রথম রাশিটির সমান, অর্থাৎ নির্দিষ্ট ধ্রুব পরিমাণের, এই স্পন্দনাঙ্কটিকে বলা হয় শ্রেণী-সীমা। প্রতিটি শ্রেণীরই একটি ক'রে শ্রেণীসীমা রয়েছে, লক্ষণীয় যে তীক্ষ্ণ এবং আবছা শ্রেণীর একই শ্রেণীসীমা রয়েছে। 5·3 সূত্রগুলিতে অজ্ঞাতরাশি δ_s, δ_p, δ_d ইত্যাদির আবির্ভাব কেন ঘটে বা এদের তাৎপর্য্য কি সে-সম্বন্ধে আমরা পরে আলোচনা করব। δ_d এবং δ_f-এর পরিমাণ প্রায় শূন্য, এজন্য মৌলিক শ্রেণীটি ঠিক পূর্ব্বোক্ত হাইড্রোজেনের প্যাশেন শ্রেণীর মত।

চিত্র 5·5: সোডিয়াম পরমাণুর শক্তিস্তর চিত্র। এই পরমাণুর ভূমিস্তর 3S, কিভাবে বিভিন্ন শক্তিস্তরের মধ্যে পরাবর্তনের ফলে শোষণ বা বিকিরণ বর্ণালীর সৃষ্টি হতে পারে তা ভগ্ন সরলরেখার দ্বারা বোঝান হয়েছে।

হাইড্রোজেনের শ্রেণীর সঙ্গে অভিন্ন ব'লেই এই শ্রেণীটির নাম দেওয়া হয়েছে মৌলিক শ্রেণী। লিথিয়ামের ভূমিস্তরে বর্ণালী সৃষ্টিকারী ইলেকট্রনটির প্রাথমিক কোয়াণ্টাম সংখ্যা $n=2$, পটাশিয়ামের $n=4$, ইত্যাদি। এই কারণে এদের বর্ণালীর শ্রেণীগুলির সূত্রও অনুরূপভাবে পরিবর্ত্তিত হয়, তবে তাদের গঠন 5·3 সম্বন্ধগুলির মত। লিথিয়াম বর্ণালীর শুদ্ধীকরণ রাশিগুলি সোডিয়ামের ক্ষেত্রে অনুরূপ রাশি δ_s, δ_p ইত্যাদির তুলনায় পৃথক এবং এদের পরিমাণও সাধারণতঃ পরীক্ষালব্ধ লিথিয়াম বর্ণালীর সঙ্গে তুলনা ক'রেই নির্ণয় করা সম্ভব।

শক্তিস্তরগুলির চিহ্নিতকরণ

কারবর্ণালী আরও বিস্তৃতভাবে ব্যাখ্যা করতে হলে শক্তিস্তরগুলি নির্দেশ করার জন্য কতগুলি সাঙ্কেতিক চিহ্ন ব্যবহার করা দরকার।

পরমাণুর প্রত্যেকটি ইলেকট্রনের চারটি কোয়াণ্টাম সংখ্যা থাকে এবং এই চিহ্নিতকরণের কাজ এমনভাবে করতে হবে যাতে ইলেকট্রনগুলির কোয়াণ্টাম অবস্থার পরিপূর্ণ এবং নির্ভুল চিত্র তাতে থাকে। চিহ্নিতকরণের কাজ নিম্নলিখিতভাবে করা হয়ে থাকে; প্রাথমিক কোয়াণ্টাম সংখ্যা n, 1, 2, 3…… ইত্যাদি সংখ্যার সাহায্যে নির্দ্দেশ করা হয়। একই প্রাথমিক কোয়াণ্টাম সংখ্যার অধীনে একাধিক শক্তিস্তর থাকতে পারে যেমন 5·5 চিত্রে দেখান হয়েছে।

বিভিন্ন কক্ষীয় কৌণিক ভরবেগবিশিষ্ট ইলেকট্রনগুলিকে ছোট ইংরাজী অক্ষর s, p, d, e, f ইত্যাদির সাহায্যে বর্ণনা করা হয়, $l=0$ কৌণিক ভরবেগ কোয়াণ্টাম সংখ্যাবিশিষ্ট ইলেকট্রনটিকে বলা হয় s ইলেকট্রন, তেমনি $l=1$, p ইলেকট্রন, $l=2$, d ইলেকট্রন, ইত্যাদি। ছোট অক্ষর l এক একটি ইলেকট্রনের কৌণিক ভরবেগ নির্দ্দেশ করে। এইরকম প্রত্যেকটি ইলেকট্রন ক্ষার পরমাণুর ভিতর এক একটি স্বতন্ত্র শক্তিস্তরের সৃষ্টি করে। পূর্ব্বেই নির্দ্দেশ করা হয়েছে যে, সমগ্র পরমাণুটির কোয়াণ্টাম অবস্থা বর্ণনা করতে ইংরাজী বড় অক্ষর S, P, D প্রভৃতির ব্যবহার হয়, S-স্তর বলতে বোঝায় ঐ স্তরে সমগ্র পরমাণুটির যাবতীয় ইলেকট্রনগুলির কক্ষীয় কৌণিক ভরবেগের যোগফলের পরিমাণ শূন্য, P-স্তর বলতে বোঝায় ঐ যোগফলের পরিমাণ 1, ইত্যাদি। ক্ষার ধাতুদের ক্ষেত্রে বর্ণালী সৃষ্টিকারী একমাত্র ইলেকট্রনটিই পরমাণুর মোট কৌণিক ভরবেগ নির্দ্ধারণ করে, কারণ দেখা যায় যে বাকী সমস্ত ইলেকট্রনগুলির কক্ষীয় কৌণিক ভরবেগের যোগফল শূন্য। এদের ঘূর্ণির যোগফলও শূন্য। সুতরাং এক্ষেত্রে $L=l$, 5·5 চিত্রে এজন্য শক্তিস্তরের চিহ্নগুলি বহিঃস্থ ইলেকট্রনটির ও একই সঙ্গে সমগ্র পরমাণুর কোয়াণ্টাম অবস্থা নির্দ্দেশ করে। হিলিয়াম, কার্ব্বন ইত্যাদি পরমাণুতে যেখানে একাধিক ইলেকট্রন বর্ণালী সৃষ্টির ব্যাপারে অংশগ্রহণ করে সেখানে কিন্তু ইলেকট্রনগুলির স্ব স্ব কক্ষীয় কৌণিক ভরবেগ এবং পরমাণুটির মোট কক্ষীয় কৌণিক ভরবেগ সাধারণতঃ পরস্পর পৃথক হয়ে থাকে। 5·5 চিত্রে সহজভাবে বর্ণনা করার উদ্দেশ্যে S, P, D ইত্যাদি স্তরগুলিকে একত্র না রেখে পাশাপাশি সরিয়ে দিয়ে দেখান হয়েছে, স্পষ্টতঃই শক্তিস্তরগুলি n এবং l উভয় কোয়াণ্টাম সংখ্যার উপরই নির্ভরশীল, যদিও n-এর উপর নির্ভরশীলতা অপেক্ষাকৃত অনেক বেশী। S, P ইত্যাদি যেকোন স্তরসমষ্টিতেই শক্তি-স্তরগুলি n-এর পরিমাণ বৃদ্ধির সঙ্গে সঙ্গে ক্রমশঃ উঁচুতে উঠতে থাকে অর্থাৎ এদের শক্তি বৃদ্ধি পেতে থাকে এবং সেই সঙ্গে নিকটবর্ত্তী দুটি স্তরের মধ্যে

ব্যবধানও ক্রমশঃ কমে আসতে থাকে। কোয়ান্টাম বলবিজ্ঞানের সাহায্যে হাইড্রোজেনের বর্ণালী বিশ্লেষণ্ করলে দেখা যায় যে, সেখানে শক্তিস্তরগুলি শুধু প্রাথমিক কোয়ান্টাম সংখ্যা n-এর উপর নির্ভরশীল, l নিরপেক্ষ। এই হিসাবে হাইড্রোজেন ও ক্ষার বর্ণালীর ভিতর এক মৌলিক পার্থক্য আছে। মনে রাখতে হবে বোর তত্ত্বের n-এর সঙ্গে কোয়ান্টাম বলবিজ্ঞান প্রদত্ত n-এর সংজ্ঞারও পার্থক্য বিদ্যমান, কিন্তু কোয়ান্টাম বলবিজ্ঞান প্রদত্ত হাইড্রোজেনের শক্তিস্তরগুলি l নিরপেক্ষ, এই কারণেই সেক্ষেত্রে কোয়ান্টাম বলবিজ্ঞান এবং বোর তত্ত্ব প্রদত্ত সূত্রগুলি পরস্পর অভিন্ন হয়।

পরমাণুর ভিতর ইলেকট্রনগুলি একটি শক্তিস্তর থেকে অপর একটি শক্তিস্তরে পরাবর্তনের সময় কতগুলি পরিচয়ন নীতি (selection rule) মেনে চলে, এগুলিও কোয়ান্টাম বলবিজ্ঞানের দ্বারা সহজেই প্রতিপন্ন করা যায়। সোডিয়াম বর্ণালী ও অন্যান্য ক্ষার বর্ণালীর ক্ষেত্রে একটি পরিচয়ন নীতি হ'ল

$$\Delta L = \Delta l = \pm 1 \qquad \cdots \quad 5{\cdot}4$$

l হ'ল পরাবর্তনকারী ইলেকট্রনটির কক্ষীয় কৌণিক ভরবেগ কোয়ান্টাম সংখ্যা এবং Δl বলতে বোঝায় কোন একটি পরাবর্তনে l কোয়ান্টাম সংখ্যার পরিবর্তনের পরিমাণ। পরিচয়ন নীতির তাৎপর্য্য হ'ল এই যে, শুধু এমন পরাবর্তনই ঘটতে পারে যেখানে 5·4 সম্বন্ধটি পালিত হবে, শোষণ বা বিকিরণ উভয় প্রক্রিয়াতেই এই পরিচয়ন নীতি ক্রিয়াশীল থাকে। কোয়ান্টাম সংখ্যা n-এর জন্য কোন পরিচয়ন নীতি নেই। দুটি স্তরের ভিতর পরাবর্তন ঘটতে হলে তাদের কৌণিক ভরবেগ কোয়ান্টাম সংখ্যার পার্থক্য 1 হতে হবে, এজন্যই $S \rightarrow S$, $F \rightarrow P$ ইত্যাদি পরাবর্তন সম্ভব নয়, শক্তিস্তর চিত্র থেকে এই পরিচয়ন নীতির ক্রিয়াশীলতা লক্ষ্য করা যাবে। শক্তিস্তর চিত্রের বর্ণনা অনুযায়ী ক্ষার বর্ণালীর বিভিন্ন শ্রেণীগুলিকে নিম্নলিখিত পরাবর্তন হিসাবে উপস্থাপিত করা যায়

প্রধান শ্রেণী : $3S \leftrightarrow nP$, $n = 3, 4, 5, \cdots\cdots$

তীক্ষ্ণ শ্রেণী : $3P \leftrightarrow nS$, $n = 4, 5, 6, \cdots\cdots$ (5·5)

আবছা শ্রেণী : $3P \leftrightarrow nD$, $n = 3, 4, 5, \cdots\cdots$

মৌলিক শ্রেণী : $3D \leftrightarrow nF$, $n = 4, 5, 6, \cdots\cdots$

স্পষ্টতঃই প্রত্যেক শ্রেণীর প্রত্যেক রেখাই 5·4 পরিচয়ন নীতি মেনে চলে এবং একারণেই এরা বর্ণালীর ভিতর আবির্ভূত হতে পারে। পরিচয়ন

নীতিগুলির অস্তিত্বের ফলে বর্ণালী অপেক্ষাকৃত অনেক সরল হয়, উপরিলিখিত 5·4 সম্বন্ধটি কার্য্যকরী না হলে আরও অনেক পরাবর্ত্তন সম্ভব হ'ত এবং তার ফলে বর্ণালীতে আরও অনেক বেশীসংখ্যক রেখার সৃষ্টি হ'ত। অবশ্য এই পরিচয়ন নীতির ব্যতিক্রমও অবস্থা বিশেষে লক্ষ্য করা যায়; উদাহরণস্বরূপ, তীব্র বৈদ্যুতিকক্ষেত্রের ভিতর রেখে পরমাণুকে উত্তেজিত করলে $S \rightarrow S, S \rightarrow D$, ইত্যাদি পরাবর্ত্তন লক্ষ্য করা সম্ভব।

ক্ষার বর্ণালীর ক্ষেত্রে বিভিন্ন শ্রেণীর সূত্রগুলি কেন বোর সূত্রসমূহ থেকে পৃথক হয় এবং কিভাবে এদের ভিতর কতগুলি অজ্ঞাত রাশির উদ্ভব হয় সে সম্বন্ধে এবার বলা যেতে পারে। আমরা আগেই বলেছি ক্ষার ধাতুর ক্ষেত্রে সবচেয়ে বাইরের ইলেকট্রনটিই শুধু বর্ণালী সৃষ্টিতে অংশগ্রহণ করে। এই ইলেকট্রনটিই আবার ক্ষার পরমাণুর যাবতীয় রাসায়নিক ক্রিয়াকলাপের জন্য দায়ী, একে এজন্য বলা হয় যোজ্যতা (valence) ইলেকট্রন। বহিঃস্থ এই ইলেকট্রনটি যদি সম্পূর্ণ বৃত্তাকার কক্ষে চলতে থাকে তাহলে এটি কেন্দ্রীনের যে আধান অনুভব করবে তা একটি প্রোটনের আধানের সমান। কিন্তু এর কক্ষপথ যদি বৃত্তাকার না হয় তবে কখন কখন এটি অভ্যন্তরস্থ ইলেকট্রনের স্তর অতিক্রম ক'রে কেন্দ্রীনের অনেক নিকটে চলে আসতে পারে, উপবৃত্তাকার কক্ষপথ হলে এরকম ঘটা সম্ভব, ইলেকট্রনের এইভাবে কেন্দ্রীনের সম্মুখীন হবার ঘটনাকে বলা হয় এর অন্তর্গমন। অন্তর্গমনের ফলে ইলেকট্রনটির উপর ক্রিয়াশীল কেন্দ্রীনের আধানের পরিমাণ বৃদ্ধি পায়, অর্থাৎ বহিঃস্থ ইলেকট্রনটি অন্তঃস্থ ইলেকট্রনের অন্তরাল অতিক্রম ক'রে ভিতরে এলে পর কেন্দ্রীনের তীব্রতর আকর্ষণের সম্মুখীন হয় এবং তার ফলে এর মোট শক্তির পরিমাণ হ্রাস পায়। মোট ফলাফল হ'ল এই যে, অন্তর্গমন না ঘটলে ইলেকট্রনের শক্তিস্তরটি যেখানে থাকত তার তুলনায় এটি অনেক নীচে নেমে আসে।

অন্তর্গমনশীল ইলেকট্রনের কক্ষপথের আকৃতি বৃত্তাকার নয় এজন্য বোর সূত্রের মত সহজ সূত্রের সাহায্যে এদের শক্তিস্তরগুলির বিবরণ দেওয়া সম্ভব নয়। কোয়াণ্টাম বলবিজ্ঞানের দৃষ্টিকোণ থেকেও অন্তর্গমন প্রক্রিয়া বিচার করা সম্ভব। এর সাহায্যে একাধিক ইলেকট্রনবিশিষ্ট পরমাণুর ভিতর ইলেকট্রনের গতি নির্ণয় করার জন্য নানাধরণের জটিল গণনা করা হয়েছে এবং দেখা যায় যে অন্তর্গমনের ফলে ইলেকট্রনের মোট শক্তির পরিমাণ সবসময়ই হ্রাস পায়। কোয়াণ্টাম বলবিজ্ঞানের গণনা যথেষ্ট জটিল, তবে বোর-সমারফেল্ড তত্ত্বের প্রয়োগের দ্বারাও অন্তর্গমন প্রক্রিয়াটি মোটামুটি সন্তোষজনকভাবে বিচার করা যায়। অন্তর্গমন না ঘটলে কক্ষগুলি বোর কক্ষের

মতই বৃত্তাকার হবে এবং তখন বোর সূত্র অনুযায়ী শক্তিস্তরগুলির জন্য আমরা লিখতে পারি

$$E_n = -Rhc/n^2$$

অন্তর্গমনের ফলে যেহেতু মোট শক্তির পরিমাণ হ্রাস পায় সুতরাং উপরিলিখিত সম্বন্ধটি পরিবর্তিত ক'রে নিম্নলিখিতরূপে লেখা যায়

$$E_n = -\frac{Rhc}{(n-\delta)^2}, \delta > 0 \quad \cdots \qquad 5{\cdot}6$$

অর্থাৎ যেন অন্তর্গমনের ফলে প্রাথমিক কোয়াণ্টাম সংখ্যার পরিমাণ খানিকটা হ্রাস পেয়ে শক্তিস্তরগুলি কিছুটা নীচে নেমে আসছে। যে কক্ষপথের অন্তর্গমন যত বেশী, তার উপর কেন্দ্রীনের প্রভাব তত বেশী এবং সেই শক্তিস্তরটি ঠিক তত নীচে নেমে আসবে। দেখান যায় যে, s কক্ষপথগুলির অন্তর্গমন সবচেয়ে বেশী হয়, p, d, f ইত্যাদি কক্ষগুলির অন্তর্গমন ক্রমিকভাবে হ্রাস পেতে থাকে। ঘটনাটি নিম্নলিখিতভাবে উপস্থাপিত করা যায়।

$$\begin{array}{cccc} s & p & d & f \end{array}$$
$$\delta = \delta_s > \delta_p > \delta_d > \delta_f$$

5·1 সারণীতে সোডিয়ামের বর্ণালীর শুদ্ধিকরণ রাশিগুলির একটি তালিকা দেওয়া হয়েছে। সুতরাং এইভাবে অন্তর্গমনশীল কক্ষপথগুলির অবস্থিতির ফলে ক্ষার ধাতুতে ইলেকট্রনের বিভিন্ন কৌণিক ভরবেগবিশিষ্ট শক্তিস্তরগুলির শক্তি পরস্পরের থেকে পৃথক হয়ে থাকে। আমাদের আলোচনায় ধ'রে নেওয়া হয়েছে যে δ_s, δ_p ইত্যাদি শুদ্ধীকরণ রাশিগুলির মান প্রাথমিক কোয়াণ্টাম সংখ্যা n-এর উপর নির্ভর করে না, 5·1 সারণীতে প্রদত্ত δ-এর মানগুলি থেকেও এ প্রস্তাবটি মোটামুটি সমর্থিত হয়। d এবং f স্তরগুলির অন্তর্গমন খুব কম এজন্য শুদ্ধীকরণ রাশিগুলির পরিমাণ নগণ্য, এই স্তরগুলির মধ্যে পরাবর্তনের ফলে যেসব বিকিরণের সৃষ্টি হয় সেগুলি বোর সূত্রের সাহায্যেই প্রকাশ করা চলে এবং এটিই হ'ল মৌলিক শ্রেণীর তাৎপর্য্য।

5·1 সারণী : পরীক্ষালব্ধ সোডিয়াম বর্ণালীর শুদ্ধীকরণ রাশি (δ)

শক্তিস্তর	$n=3$	$n=4$	$n=5$	$n=6$	$n=7$	$n=8$
S	1·37	1·36	1·35	1·35	1·35	1·35
P	0·88	0·87	0·86	0·86	0·86	0·86
D	0·01	0·01	0·01	0·01	0·01	0·01
F	প্রতি স্তরেই শুদ্ধীকরণ রাশির মান নগণ্য					

উপরের আলোচনা থেকে ক্ষার বর্ণালী সম্বন্ধে একটি যুক্তিসঙ্গত ধারণা আমরা পাই এবং কি বিষয়ে ও কি কারণে হাইড্রোজেন বর্ণালীর সঙ্গে তাদের পার্থক্য সৃষ্টি হয় তাও আমরা বুঝতে পারি। কিছু কিছু আয়ন যাদের অভ্যন্তরীণ ইলেকট্রন বিন্যাসের সঙ্গে ক্ষার পরমাণুর ইলেকট্রন বিন্যাসের সাদৃশ্য আছে তাদের বর্ণালীও ক্ষার বর্ণালীর অনুরূপ। Be^+, Mg^+, Ca^+ ইত্যাদি পর্য্যায় সারণীর দ্বিতীয় বিভাগের পরমাণুগুলির আয়ন এ পর্য্যায়ে পড়ে। এইসব আয়নগুলির ভিতরেও কতগুলি সুসংহত নিষ্ক্রিয় ইলেকট্রনের সেল থাকে এবং ঐ ইলেকট্রনগুলি বর্ণালী সৃষ্টিতে কোনরূপ অংশগ্রহণ করে না, এই সেলগুলির বাইরে থাকে একটিমাত্র ইলেকট্রন অর্থাৎ ঠিক ক্ষার পরমাণুর ইলেকট্রন বিন্যাসের মত।

ক্ষার বর্ণালীর সূক্ষ্মবিভাজন (Fine structure)

ক্ষার বর্ণালীতে আরও কতগুলি জটিলতা আছে পূর্ব্ববর্ত্তী পরিচ্ছেদের আলোচনা থেকে যাদের সমাধান পাওয়া যায় না, এই বর্ণালীর সূক্ষ্ম-বিভাজন এইরকম একটি সমস্যা। অত্যধিক বিশ্লিষ্টকরণক্ষম বর্ণালী মাপনীর সাহায্যে ক্ষার বর্ণালীর প্রতিটি রেখাকেই একাধিক স্বতন্ত্র তরঙ্গদৈর্ঘ্যবিশিষ্ট রেখায় বিশ্লিষ্ট করা যায়। তীক্ষ্ণ ও প্রধান শ্রেণীর রেখাগুলি প্রত্যেকটিই দুটি রেখায় বিভক্ত হয়ে যায় এবং আবছা শ্রেণীর রেখাগুলি তিনটি ক'রে রেখায় বিভক্ত হয়। এই বিভাজনকে বলা হয় সূক্ষ্মবিভাজন। বিশেষ ক্ষেত্রে যখন বিভাজিত স্পন্দনাঙ্কের সংখ্যা দুই, তখন একে বলা হয় ক্ষার বর্ণালীর দ্বিত্ব বিভাজন। সূক্ষ্মবিভাজন সৃষ্টির কারণ হ'ল এই যে, আসলে ক্ষার পরমাণুর অধিকাংশ শক্তিস্তরই খুব নিকটবর্ত্তী দুটি পৃথক শক্তিস্তরে বিভক্ত থাকে। 5·6 চিত্রে সোডিয়াম পরমাণুর বিভিন্ন শক্তিস্তরগুলির সূক্ষ্মবিভাজনের প্রকৃতি নির্দেশ করা হয়েছে। S-স্তরগুলির কোন সূক্ষ্মবিভাজন থাকে না, অন্যান্যগুলি দুটি ক'রে শক্তিস্তরে বিভক্ত হয়ে যায়। P, D, F ইত্যাদি স্তরগুলির সূক্ষ্মবিভাজনের পরিমাণ প্রাথমিক কোয়াণ্টাম সংখ্যার বৃদ্ধির সাথে সাথে হ্রাস পেতে থাকে। এইজন্য প্রধান শ্রেণীতে যেখানে P স্তর থেকে S স্তরে পরাবর্ত্তন হয়, n-এর পরিমাণ বৃদ্ধির সাথে সাথে সূক্ষ্মবিভাজনের পরিমাণও কমে যেতে থাকে। তীক্ষ্ণ শ্রেণীতে $n\text{S} \rightarrow 3\text{P}$ পরাবর্ত্তন হয় এজন্য প্রত্যেক রেখারই সমপরিমাণ সূক্ষ্মবিভাজন দৃষ্ট হয়। আবছা শ্রেণীর ক্ষেত্রে প্রারম্ভিক ও প্রান্তিক দুটি স্তরেরই সূক্ষ্মবিভাজন আছে। এজন্য এদের মধ্যে বিভিন্ন পরাবর্ত্তন সম্ভব, কিন্তু কতগুলি নূতন পরিচয়ন নীতির অস্তিত্বের ফলে মাত্র তিনটি

পরাবর্তন ঘটতে পারে এবং আবদ্ধ শ্রেণীর সূক্ষ্মবিভাজনে তিনটি বিভিন্ন রেখা দৃষ্ট হয়; তবে D-স্তরে সূক্ষ্মবিভাজন খুবই সামান্য এজন্য শক্তিশালী বর্ণালী বিশ্লেষক না হলে মাত্র দুটি রেখাই দৃষ্ট হয়। মৌলিক শ্রেণীতে সূক্ষ্মবিভাজনের পরিমাণ খুবই নগণ্য।

সূক্ষ্মবিভাজনের মূল কারণ হ'ল ইলেকট্রনের ঘূর্ণি এবং তজ্জনিত চৌম্বক-ভ্রামক। বোর তত্ত্বের প্রতিষ্ঠার পর থেকেই বিজ্ঞানীরা নানারকম প্রকল্প প্রয়োগ ক'রে সূক্ষ্মবিভাজনের ব্যাখ্যা দেবার চেষ্টা করতে থাকেন। গাউডস্মিড প্রস্তাব করেন যে ইলেকট্রনের নির্দিষ্ট পরিমাণ ঘূর্ণি আছে ধ'রে নিলে এই সূক্ষ্মবিভাজন প্রক্রিয়ার ব্যাখ্যা পাওয়া যেতে পারে। ইলেকট্রনের কক্ষীয় কৌণিক ভরবেগজাত এবং ঘূর্ণিজাত চৌম্বক ভ্রামকদ্বয় পরস্পরের সঙ্গে ক্রিয়া ক'রে শক্তিস্তরগুলিকে বিশ্লিষ্ট ক'রে ফেলতে পারে।

সূক্ষ্মবিভাজনের ক্ষেত্রে ইলেকট্রনের শক্তিস্তরগুলি এর সম্মিলিত কৌণিক ভরবেগ দ্বারা সূচিত হয়, এই সম্মিলিত কৌণিক ভরবেগ হ'ল কক্ষীয় কৌণিক ভরবেগ এবং ঘূর্ণির যোগফল। সূক্ষ্মবিভাজন সম্বন্ধে বিস্তৃত আলোচনার জন্য কিভাবে কোয়াণ্টাম বলবিজ্ঞানে দুটি কৌণিক ভরবেগ যোগ করা হয় সে-সম্বন্ধে অবহিত হওয়া প্রয়োজন। পরমাণুর ভিতর কৌণিক ভরবেগ সবসময়ই শুধু কতগুলি কোয়াণ্টাম পরিমাণে আবির্ভূত হয়, এদের যোগকরণের পদ্ধতিও কোয়াণ্টাম বলবিজ্ঞান অনুযায়ী হতে হবে এবং ঐ পদ্ধতি প্রাচীন পদার্থবিজ্ঞানের স্বাভাবিক ভেক্টর যোগকরণ পদ্ধতির তুলনায় স্বতন্ত্র। এই যোগকরণ পদ্ধতি নিম্নলিখিত রূপ: ধরা যাক, দুটি কৌণিক ভরবেগ ভেক্টর $\vec{j}_1$ এবং $\vec{j}_2$, এদের পরিমিতি হবে যথাক্রমে

$$|\vec{j}_1| = \sqrt{j_1(j_1+1)}\hbar$$
$$|\vec{j}_2| = \sqrt{j_2(j_2+1)}\hbar$$

কোয়াণ্টাম বলবিজ্ঞান অনুসারে এদের যোগ করলে যে নূতন সম্মিলিত ভরবেগ পাওয়া যাবে তা হ'ল $\vec{j}$

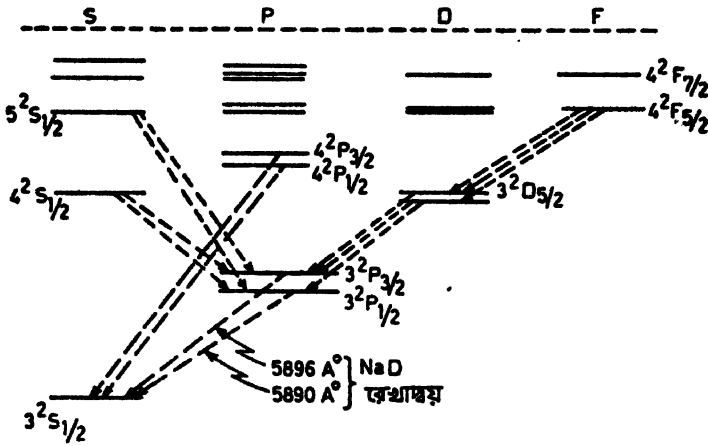
$$\vec{j}_1+\vec{j}_2=\vec{j}$$

এবং এই $\vec{j}$ ভেক্টরের পরিমিতি হবে

$$|\vec{j}| = \sqrt{j(j+1)}\hbar$$

এখানে j নিম্নলিখিত বিভিন্ন পরিমাণের হতে পারে

$$j=j_1+j_2,\ j_1+j_2-1,\ \cdots\cdots|j_1-j_2|+1,\ |j_1-j_2| \qquad 5\cdot7$$

j-এর পরিমাণ 5·7 সম্বন্ধ প্রদত্ত পরিমাণগুলির যেকোন একটি হতে পারে এবং পরমাণুর ভিতর ইলেকট্রনের এক একটি বিভিন্ন j পরিমাণের জন্য এক একটি ক'রে নূতন শক্তিস্তর সৃষ্টি হবে। j-কে বলা হয় মোট কৌণিক ভরবেগ কোয়াণ্টাম সংখ্যা, মোট কৌণিক ভরবেগের দেশ কোয়াণ্টীভবন ঘটে এবং কোন একটি নির্দ্দিষ্ট দিকে এর চরম অভিক্ষেপ হ'ল $j\hbar$। কক্ষীয় কৌণিক ভরবেগ কোয়াণ্টাম সংখ্যা সবসময়ই পূর্ণ সংখ্যায় প্রকাশিত এবং ইলেকট্রনের ঘূর্ণি $\frac{1}{2}$, এজন্য ক্ষার পরমাণুতে এদের যোগফল সবসময়ই অর্দ্ধ অখণ্ড সংখ্যায় প্রকাশিত হবে। যেকোন পরমাণুতেই মোট কৌণিক ভরবেগ অখণ্ড অথবা অর্দ্ধ অখণ্ড সংখ্যায় প্রকাশিত। 5·7 সর্ত্তটি হ'ল দুটি কৌণিক ভরবেগ কোয়াণ্টাম সংখ্যা যোগ করার মূল নীতি এবং এর দ্বারা প্রত্যেক ক্ষেত্রে অতি সহজে বিভাজিত শক্তিস্তরগুলির সংখ্যা নির্দ্ধারণ করা যায়। উদাহরণস্বরূপ, ক্ষার বর্ণালীতে $l=1$ কৌণিক ভরবেগের সঙ্গে ইলেকট্রনের ঘূর্ণি $\frac{1}{2}$ যোগ করলে আমরা পাই

চিত্র 5·6

সোডিয়ামের শক্তিস্তরগুলির দ্বিত্ব সূক্ষ্মবিভাজন (বাস্তব অনুপাত অনুযায়ী আঁকা নয়)।

$j=\frac{1}{2}, \frac{3}{2}$। প্রথম ক্ষেত্রে চৌম্বক ভ্রামকদ্বয় পরস্পরের বিপরীত দিকে এবং দ্বিতীয় ক্ষেত্রে একই দিকে থাকে। একারণেই এই দুই ক্ষেত্রে চৌম্বক বিভব শক্তির পার্থক্য হয় এবং ফলে শক্তিস্তরের বিভাজন ঘটে। এইভাবে, $l=2$-এর জন্য $j=\frac{3}{2}, \frac{5}{2}$, $l=0$-এর জন্য $j=\frac{1}{2}$, ইত্যাদি। S-স্তরের মোট কৌণিক ভরবেগ সবসময়ই $\frac{1}{2}$ এজন্য এ স্তরটির কোন বিভাজন ঘটে না, কিন্তু P, D, F ইত্যাদি বাকী প্রত্যেকটি স্তর দুটি পৃথক শক্তিস্তরে বিভক্ত হয়ে যায়।

কোয়াণ্টাম সংখ্যা J এবং পরিচয়ন নীতি

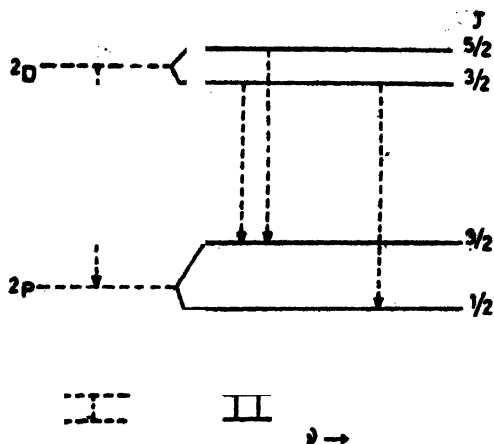
আমরা দেখলাম ঘূর্ণ ও কক্ষীয় আবর্তনজনিত কৌণিক ভরবেগ একত্র হয়ে মোট কৌণিক ভরবেগ j-এর সৃষ্টি করে। একটি বিশেষ শক্তিস্তর যার মোট কৌণিক ভরবেগ j, এর চিহ্নিতকরণের জন্য কতগুলি নূতন সূচক ব্যবহার করার প্রয়োজন হয়। ঠিক পূর্ব্বের মতই, ছোট অক্ষর j একটি ইলেকট্রনের মোট কৌণিক ভরবেগ নির্দেশ করে, বড় অক্ষর J সমগ্র পরমাণুটির মোট কৌণিক ভরবেগ নির্দেশ করে এবং ক্ষার বর্ণালীর ক্ষেত্রে এই উভয় পরিমাণ সমান। কোন একটি শক্তিস্তর, যেমন $^2S_{\frac{1}{2}}$, এটি নির্দেশ করে পরমাণুর এমন একটি স্তর যার $L=0$, $J=\frac{1}{2}$, তেমনি $^2P_{\frac{3}{2}}$ বলতে বোঝায় $L=1$, $J=\frac{3}{2}$, ইত্যাদি। মূর্দ্ধসংখ্যা 2, স্তরটিতে মোট কতগুলি সূক্ষ্মবিভাজিত শক্তিস্তরের অস্তিত্ব আছে তা নির্দেশ করে এবং পদসংখ্যা $\frac{1}{2}$, $\frac{3}{2}$ ইত্যাদি, বিশেষ একটি স্তরের মোট কৌণিক ভরবেগ কোয়াণ্টাম সংখ্যাকে (J) নির্দেশ করে। আমরা দেখেছি ক্ষার পরমাণুর P-স্তরটি দুটি সূক্ষ্মবিভাজিত স্তরে বিভক্ত থাকে, এই ঘটনাটি বোঝাবার জন্যই স্তরের পরিচয়সূচক অক্ষরের মাথায় 2 সংখ্যাটি বসান হয় (5·6 চিত্র)। S-স্তরের কোন সূক্ষ্মবিভাজন নেই, এই স্তরে মোট কৌণিক ভরবেগের একমাত্র মান $J=\frac{1}{2}$; কিন্তু তথাপি S-স্তরের সঙ্গে পরিচয়সূচক 2 মূর্দ্ধসংখ্যার ব্যবহার সর্ব্বত্র প্রচলিত।

নূতন কোয়াণ্টাম সংখ্যা J-এর আবির্ভাব হেতু কতগুলি নূতন পরিচয়ন নীতির সৃষ্টি হয়, এগুলি হ'ল নিম্নলিখিতরূপ

$$\Delta J = 0 \text{ অথবা } \pm 1 \qquad \ldots \qquad 5·8$$

$J=0$ স্তর থেকে $J=0$ স্তরে পরাবর্ত্তন নিষেধ

L-এর পরিচয়ন নীতি অবশ্য অপরিবর্ত্তিত থাকে এবং যেকোন পরাবর্ত্তনে L এবং J উভয়ের পরিচয়ন নীতিই একত্রে ক্রিয়াশীল থাকে। এই পরিচয়ন নীতিগুলির ক্রিয়াশীলতার ফলে বর্ণালীর প্রকৃতি কিরকম দাঁড়ায় তা 5·7 চিত্রে দেখান হয়েছে, এখানে আবহ্য শ্রেণীর সূক্ষ্মবিভাজন কিভাবে সৃষ্টি হয় তা দেখা যাচ্ছে। আবহ্য শ্রেণীর পরাবর্ত্তন হ'ল nD→3P অর্থাৎ উপর ও নীচের দুটি স্তরই সূক্ষ্ম বিভক্ত। বাঁদিকের রেখাটি সূক্ষ্মবিভাজন আদৌ না ঘটলে স্তরটি যেখানে থাকত তা নির্দেশ করে। 5·8 পরিচয়ননীতির ফলে $^2D_{\frac{5}{2}} \rightarrow {}^2P_{\frac{1}{2}}$ পরাবর্ত্তন সম্ভব নয়, বাকী সমস্ত পরাবর্ত্তনগুলি তীর চিহ্নের সাহায্যে দেখান হয়েছে। বাঁদিকের

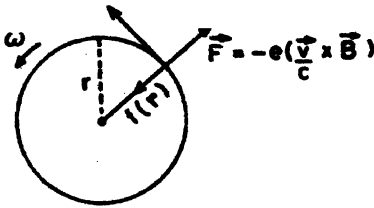
তম রেখা সূক্ষ্মবিভাজন না ঘটলে আবছা শ্রেণীর যে একটি মাত্র রেখার উদ্ভব হ'ত সেটি নির্দেশ করছে।

চিত্র 5·7 : আবছা শ্রেণীর রেখাগুলির সূক্ষ্মবিভাজন।

$^2D_{5/2} \rightarrow {}^2P_{3/2}$ এবং $^2D_{3/2} \rightarrow {}^2P_{3/2}$ রেখাদ্বয়ের স্পন্দনাঙ্ক পরস্পরের খুবই নিকটবর্ত্তী কারণ D-স্তরের সূক্ষ্মবিভাজন অপেক্ষাকৃত অনেক কম, এজন্য এরা প্রায় একই রেখা হিসাবে দৃষ্ট হয়। একই ধরণের চিত্র এঁকে এবং 5·8 পরিচয়ন নীতি প্রয়োগ ক'রে দেখান যায় যে প্রধান ও তীক্ষ্ণ শ্রেণীর রেখাগুলিতে দুটি ক'রে স্পন্দনাঙ্কের অস্তিত্ব থাকবে। পরীক্ষালব্ধ সূক্ষ্ম-বিভাজনের প্রকৃতি এইপ্রকার গঠনকল্প থেকে প্রাপ্ত ফলাফলের সঙ্গে সম্পূর্ণ সামঞ্জস্যপূর্ণ, এবং এথেকে এই গঠনকল্প অর্থাৎ ইলেকট্রনের নির্দিষ্ট ঘূর্ণজনিত চৌম্বক ভ্রামকের অস্তিত্বের প্রকল্প যথার্থ প্রমাণিত হয়। এখানে উল্লেখ করা যায় যে সোডিয়ামের হলুদ রেখাটির দ্বিত্ব বিভাজন (5890A° এবং 5896A°) বর্ণালীর প্রধান শ্রেণীতে ($3^2P \rightarrow 3^2S$) আবির্ভূত হয়। হাইড্রোজেন বর্ণালীর রেখাগুলির সূক্ষ্মবিভাজন একই পদ্ধতিতে ঘটে এবং কোয়ান্টাম সংখ্যা J-এর সাহায্যে ঐ বিভাজনের ব্যাখ্যা করা যায়, তবে সেক্ষেত্রে বিভাজনের পরিমাণ হয় অপেক্ষাকৃত অনেক কম।

জীম্যান (Zeeman) প্রক্রিয়া

বিজ্ঞানী জীম্যান (Zeeman) সর্ব্বপ্রথম একটি পরীক্ষায় লক্ষ্য করেন যে, কোন গ্যাসপূর্ণ নল যার ভিতর পরমাণুকে উত্তেজিত ক'রে বর্ণালী সৃষ্টি করা হচ্ছে, এটিকে যদি একটি তীব্র চৌম্বকক্ষেত্রের ভিতর রাখা যায় তবে সৃষ্ট

বর্ণালীর রেখাগুলি একাধিক পাশাপাশি অবস্থিত রেখায় বিভক্ত হয়ে যায়। এই প্রক্রিয়াটির নাম জীম্যান প্রক্রিয়া। জীম্যানের আবিষ্কারের অব্যবহিত পরে লরেণ্টজ ইলেকট্রন তত্ত্ব ও সনাতন পদার্থবিজ্ঞানের ভিত্তিতে এই প্রক্রিয়াটির একটি ব্যাখ্যা দিতে সক্ষম হন। কিছু কিছু মৌলের বর্ণালীর কতগুলি রেখার উপর জীম্যান প্রক্রিয়া লক্ষ্য ক'রে দেখা যায় যে, যদি চৌম্বকক্ষেত্র বরাবর লক্ষ্য করা হয় তবে রেখাগুলি দুটি পাশাপাশি রেখায় বিভক্ত হিসাবে দেখায়, আর যদি চৌম্বকক্ষেত্রের সঙ্গে সমকোণে লক্ষ্য করা হয় তবে দেখা যায় যে এরা প্রত্যেকে তিনটি রেখায় বিভক্ত হয়ে গিয়েছে। একে বলা হয় "স্বাভাবিক" জীম্যান প্রক্রিয়া এবং সনাতন পদার্থবিজ্ঞানের ভিত্তিতে এর একটি সহজ ব্যাখ্যা দেওয়া সম্ভব।

প্রথমে দেখা যাক যদি ইলেকট্রনটি পরমাণুর ভিতর একটি বৃত্তাকার কক্ষে আবর্তিত হতে থাকে তাহলে এর গতির উপর চৌম্বকক্ষেত্রের প্রভাব কিরকম হবে। ধরা যাক, এরকম একটি ইলেকট্রন কক্ষ XY সমতলে আছে এবং চৌম্বকক্ষেত্র ঐ সমতলের সঙ্গে লম্বভাবে রয়েছে। ইলেকট্রনটির উপর কেন্দ্রমুখী বলের পরিমাণ একটি রাশি $f(r)$ যেটি শুধুমাত্র ব্যাসার্ধের অপেক্ষক। যদি একটি চৌম্বকক্ষেত্র B, Z অক্ষের বরাবর স্থাপিত থাকে তবে এই ক্ষেত্রটি প্রতিটি ঘূর্ণনশীল ইলেকট্রনের উপর F পরিমাণ বল সৃষ্টি করবে যা লরেণ্টজ-এর সমীকরণ দ্বারা প্রদত্ত

চিত্র 5·8 : পরমাণুর ভিতর আবর্তনশীল ইলেকট্রনের উপর ক্রিয়াশীল বল।

$$\vec{F} = -e\left(\frac{\vec{v} \times \vec{B}}{c}\right) \qquad 5{\cdot}9$$

ঐই ভেক্টর গুণফল থেকে বোঝা যায় যে, যদি ইলেকট্রনটি XY সমতলে থেকে ঘড়ির কাঁটার বিপরীত দিকে ঘুরতে থাকে এবং যদি চৌম্বকক্ষেত্র B-এর দিক ঐ সমতলের অভ্যন্তরের দিকে থাকে তবে এই অতিরিক্ত বল F ব্যাসার্ধ বরাবর বাইরের দিকে নির্দেশিত থাকবে (5·8 চিত্র)। কিন্তু যদি ইলেকট্রনটি ঘড়ির কাঁটার দিকে ঘুরতে থাকে তবে ঐ বল ব্যাসার্ধ বরাবর কেন্দ্রের দিকে ক্রিয়া করে। সুতরাং এথেকে, প্রতিটি ইলেকট্রনের উপর মোট বলের জন্য আমরা লিখতে পারি $f(r) \pm evB/c$; এখানে $v = \omega r$, ইলেকট্রনটির বৃত্তীয় পথে পরিভ্রমণের বেগ। ± চিহ্ন নির্ভর করে ইলেকট্রনটি চৌম্বকক্ষেত্রের দিকের

পরিপ্রেক্ষিতে ঘড়ির কাঁটার দিকে অথবা এর বিপরীতে ঘুরছে তার উপর। এই অতিরিক্ত বল যা চৌম্বকক্ষেত্র উপস্থিত থাকলে আবির্ভূত হয়, এটির প্রভাব বিস্তৃতভাবে গণনা করেন বিজ্ঞানী লারমর (Larmor)। ইনি দেখান যে মাঝামাঝি তীব্রতাসম্পন্ন চৌম্বকক্ষেত্র উপস্থিত থাকলে কক্ষটির ব্যাসার্ধের কোন পরিবর্তন হয় না, এর ফলে শুধু ইলেকট্রনের বেগ হয় বৃদ্ধি নতুবা হ্রাস পাবে। এর ফলে ইলেকট্রন আবর্তনের কৌণিক গতিবেগ কতটা পরিবর্তিত হয় তাও সহজেই গণনা করা যায়। ধরা যাক এই পরিবর্তনের পরিমাণ হল $\Delta\omega$ এবং নূতন কৌণিক গতিবেগ হবে

$$\omega = \omega_0 + \Delta\omega$$

এই অবস্থায় কেন্দ্রাভিগ শক্তির সমীকরণটি দাঁড়ায়

$$m\omega^2 r = f(r) \pm e\omega r\mathrm{B}/c$$

এবং ক্ষেত্রবিহীন অবস্থায় $m\omega_0{}^2 r = f(r)$

এই সমীকরণদ্বয় থেকে $f(r)$ অপনয়ন করলে আমরা পাই

$$mr(\omega^2 - \omega_0{}^2) = \pm e\omega r\mathrm{B}/c$$

$$m\Delta\omega(\omega + \omega_0) = \pm e\omega\mathrm{B}/c$$

যদি $\Delta\omega$-এর পরিমাণ খুব সামান্য হয় তবে আমরা $\omega + \omega_0 \sim 2\omega$ লিখতে পারি। সুতরাং এই প্রকার লঘুকরণের পর কৌণিক গতিবেগ পরিবর্তনের পরিমান দাঁড়ায়

$$\Delta\omega = \pm e\mathrm{B}/2mc \qquad \cdots \qquad 5{\cdot}10$$

যা ω_0 নিরপেক্ষ। লারমর তত্ত্ব অনুযায়ী কোন কক্ষপথের কৌণিক ভরবেগ ভেক্টরটি ধ্রুব চৌম্বকক্ষেত্রের বলরেখার চারপাশে অনুবর্তন করে এবং এই অনুবর্তনের কৌণিক গতিবেগ হ'ল $\Delta\omega$ যা 5·10 সমীকরণ থেকে আমরা পাই।

যখন জীম্যান প্রক্রিয়া আবিষ্কৃত হয় তখন পরমাণু সম্বন্ধে আধুনিক ধারণাগুলি যেমন পরমাণু কেন্দ্রীন, বোর কক্ষপথ, ইত্যাদি কিছুই জানা ছিল না। লরেন্টজ এই প্রক্রিয়া ব্যাখ্যা করতে গিয়ে যে সহজ প্রকল্পের আশ্রয় নেন তা হল এই যে, পরমাণুর ভিতর ইলেকট্রনগুলির নির্দিষ্ট ধ্রুব স্পন্দনাঙ্ক বিশিষ্ট সরল ছন্দিত গতি (simple harmonic motion) রয়েছে। স্পন্দনশীল ইলেকট্রন এর সরল ছন্দিত গতির স্পন্দনাঙ্কের সমান স্পন্দনাঙ্ক-বিশিষ্ট আলো বিকিরণ করে। একটি বিকিরণশীল পরমাণুর ভিতর এই গতি

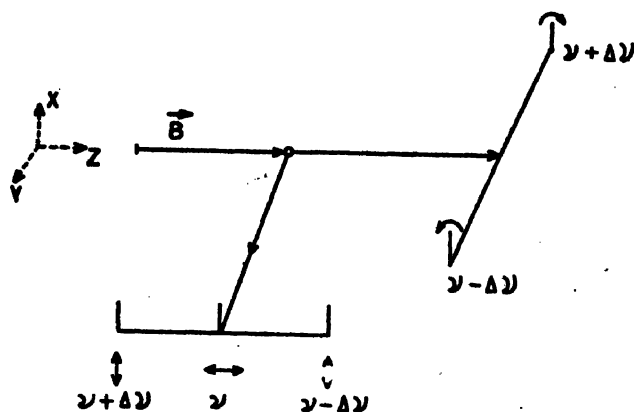
যেকোন অক্ষ বরাবর থাকতে পারে, তবে যেকোন সরল ছন্দিত গতিই X, Y এবং Z অক্ষ বরাবর স্পন্দন হিসাবে উপাংশে বিভক্ত ক'রে ফেলা যায় যাদের স্পন্দনাঙ্ক হবে অভিন্ন কিন্তু বিস্তার (amplitude) পৃথক পৃথক। চুম্বকের ভিতর একটি ফুটো ক'রে তার দ্বারা আলোকিত গ্যাসকে Z অক্ষ বরাবর অর্থাৎ চৌম্বকক্ষেত্র বরাবর লক্ষ্য করা যায়। এইভাবে দেখলে আমরা স্পন্দনের Z উপাংশের দ্বারা সৃষ্ট কোন আলো দেখতে পাব না, কারণ একটি স্পন্দনশীল বৈদ্যুতিক ক্ষেত্র এর স্পন্দনের দিক বরাবর কোন আলো বিকিরণ করে না।

X এবং Y উপাংশদ্বয় মিলিত হয়ে XY সমতলে একটি সরল ছন্দিত গতি সৃষ্টি করবে। এইরকম সরল ছন্দিত গতিকে সবসময়ই দুটি বৃত্তীয় গতির সমাহার হিসাবে দেখান যায় যাদের গতির দিক পরস্পর বিপরীতমুখী এবং যাদের কৌণিক স্পন্দনাঙ্ক সরল ছন্দিত গতির স্পন্দনাঙ্কের সঙ্গে অভিন্ন। উদাহরণ হিসাবে ধরা যাক X অক্ষ বরাবর একটি সরল ছন্দিত গতি, এটিকে দুটি বৃত্তীয় গতিতে বিভাজিত ক'রে নিম্নলিখিত গাণিতিক উপায়ে উপস্থাপিত করা যায়

$$x = A\cos\omega t = \tfrac{1}{2}A[\exp.(i\omega t) + \exp.(-i\omega t)]$$

এখানে $i = \sqrt{-1}$ ডানদিকের সর্ব্বশেষ প্রকাশনটি দুটি বিপরীতমুখী বৃত্তীয় গতিকে নির্দেশ করে। সুতরাং পূর্ব্ববর্ত্তী সরল ছন্দিত গতির উপর চৌম্বক-ক্ষেত্রের ক্রিয়া এই দুই বিপরীতমুখী বৃত্তীয় গতির উপর চৌম্বকক্ষেত্রের ক্রিয়ার মাধ্যমে প্রকাশ করা চলে। এবার আমাদের পূর্ব্ববর্ত্তী আলোচনা অনুসরণ ক'রে আমরা বলতে পারি যে ক্ষেত্রের উপস্থিতির প্রতিক্রিয়া হিসাবে এদের মধ্যে একটির ক্ষেত্রে কৌণিক স্পন্দনাঙ্ক বৃদ্ধি পাবে এবং অপরটির ক্ষেত্রে হ্রাস পাবে। সুতরাং এভাবে দেখা যায় যে, ν_0 $(\omega_0 = 2\pi\nu_0)$ স্পন্দনাঙ্কবিশিষ্ট রেখাটি Z অক্ষ বরাবর দেখলে দেখাবে যে এটি দুটি রেখায় বিভক্ত হয়েছে এবং ঐ রেখাদ্বয়ের পরস্পরের বিপরীত দিকে আবর্ত্তনশীল অবস্থায় বৃত্তীয় ছন্দন রয়েছে। লরেন্টজ তত্ত্বের এই ফলাফলগুলি পরীক্ষার দ্বারা সুচারুরূপেই প্রমাণিত হয়। পরীক্ষায় আরও প্রমাণিত হয় যে স্পন্দনশীল আধান যা এই চৌম্বক-ক্ষেত্রের মধ্যে থেকে বিকিরণ করছে তা হ'ল ঋণ-আহিত। এছাড়া 5·10 সূত্রের সাহায্য নিয়ে পরীক্ষায় $\Delta\nu$ পরিমাপ ক'রে তার দ্বারা e/m অনুপাত নির্ণয় করলে যে মান পাওয়া যায় তা পূর্ব্বোক্ত ইলেকট্রনের অন্যান্য e/m পরিমাপের সঙ্গে সম্পূর্ণ সামঞ্জস্যপূর্ণ। বাস্তবিকপক্ষে জীম্যান প্রক্রিয়া হ'ল ইলেকট্রনের e/m পরিমাপের একটি প্রাচীনতম এবং অন্যতম নির্ভুল উপায়।

যদি বর্ণালী চৌম্বকক্ষেত্রের সঙ্গে লম্বভাবে লক্ষ্য করা যায় তবে দেখা যাবে যে Z স্পন্দনটি অপরিবর্তিত স্পন্দনাঙ্ক ν_0 নিয়ে ঐদিকে বিকিরণ করতে থাকে, এই বিকিরণের সমতল ছদন থাকবে, এর বৈদ্যুতিক ভেক্টর চৌম্বকক্ষেত্রের সঙ্গে সমান্তরালভাবে অবস্থান করবে। এছাড়া পূর্বোক্ত বৃত্তীয় গতিদ্বয় এইদিকে সমতল ছদনবিশিষ্ট আলো বিকিরণ করবে যাদের স্পন্দনাঙ্ক হবে $\nu_0 \pm \Delta\nu$, এদের উভয়ের বৈদ্যুতিক ভেক্টর থাকবে চৌম্বকক্ষেত্রের সঙ্গে উলম্ব অবস্থায়। 5·9 চিত্রে দুই পরস্পর লম্ব দিকে দৃষ্ট বর্ণালীর রেখাগুলি কিভাবে বিভাজিত থাকবে তা একটি ছকের সাহায্যে বোঝান হয়েছে।

জীম্যান প্রক্রিয়ার এই বিশ্লেষণ প্রথমে সনাতন ইলেকট্রন তত্ত্বের একটি বৃহৎ সাফল্য হিসাবে সূচিত হয়েছিল, কিন্তু পরবর্তী আরও পরীক্ষায় প্রমাণিত হয়েছে যে উপরোক্ত লরেণ্টজ তত্ত্বের প্রয়োগ খুবই সীমাবদ্ধ। পরবর্তী পরিচ্ছেদে আমরা জীম্যান প্রক্রিয়ার কোয়াণ্টাম শক্তিস্তর ভিত্তিক আলোচনা করব।

চিত্র 5·9 : সনাতন পদার্থবিদ্যাভিত্তিক জীম্যান প্রক্রিয়ার বিশ্লেষণ। ছোট তীরচিহ্নিত রেখাগুলি সমতল অথবা বৃত্তাকার ছদন নির্দেশ করে।

জীম্যান প্রক্রিয়া : কোয়াণ্টাম তত্ত্ব

প্রথমে নিওন, পারদ ইত্যাদি কতগুলি মৌলের বর্ণালীতে যেপ্রকার জীম্যান প্রক্রিয়া লক্ষ্য করা হয়েছিল তা পূর্বোক্ত লরেণ্টজ-এর স্বাভাবিক জীম্যান প্রক্রিয়ার বিশ্লেষণের সঙ্গে খুবই সামঞ্জস্যপূর্ণ। কিন্তু 1897 সালে প্রেস্টন ক্যাডমিয়ামের বর্ণালীতে যেপ্রকার জীম্যান প্রক্রিয়া লক্ষ্য করেন

তার প্রকৃতি স্বাভাবিক জীম্যান প্রক্রিয়ার তুলনায় পৃথক। এরপর শীঘ্রই দেখা গেল আরও অনেক বর্ণালী আছে যেগুলি চৌম্বকক্ষেত্রে অনেক জটিলতর প্রক্রিয়া সৃষ্টি করে। উদাহরণস্বরূপ, সোডিয়ামের দুটি D রেখা মোট দশটি জীম্যান রেখা সৃষ্টি করে, যদিও স্বাভাবিক প্রক্রিয়া অনুসারে আশা করা যায় মাত্র ছয়টি। এই ধরণের প্রক্রিয়াকে ব্যতিক্রমিক (anomalous) জীম্যান প্রক্রিয়া আখ্যা দেওয়া হয়েছে। কোয়ান্টাম তত্ত্বের সাহায্যে এইসকল যাবতীয় জটিলতর প্রক্রিয়া নির্ভুলভাবে বিশ্লেষণ করা যায়।

যাবতীয় কৌণিক ভরবেগেরই দেশ কোয়ান্টীভবন ঘটে এবং পরমাণুর মোট কৌণিক ভরবেগ J দেশ কোয়ান্টীভবনের ফলে বহিঃস্থ কোন চৌম্বক-ক্ষেত্রের সঙ্গে শুধু কতগুলি বিশেষ বিশেষ কোণে অবস্থান করবে, এবং সম্ভবপর মোট বিভিন্ন অবস্থানের সংখ্যা হয় $2J+1$। কৌণিক ভরবেগ J পরমাণুটির মধ্যে চৌম্বক ভ্রামকের সৃষ্টি করে এবং এর অবস্থিতির ফলে চৌম্বকক্ষেত্রের ভিতর পরমাণুটি কিছু চৌম্বক বিভবশক্তি অর্জন করবে। অর্থাৎ শক্তিস্তরের মোট শক্তির পরিমাণ বদলে গিয়ে হবে

$$W=W_0-\vec{B}\cdot\vec{\mu} \qquad \cdots \qquad 5{\cdot}11$$

এখানে $\vec{B}$ বহিঃস্থ চৌম্বকক্ষেত্রের তীব্রতা, μ পরমাণুটির চৌম্বক ভ্রামক এবং W_0 ক্ষেত্রবিহীন অবস্থার শক্তির পরিমাণ। শক্তিস্তরের এই পরিবর্তনের পরিমাণ নির্ভর করে বহিঃস্থ চৌম্বকক্ষেত্র ও পরমাণুর চৌম্বক ভ্রামকের পরিমাণের উপর, এবং এরা পরস্পরের সঙ্গে কি কোণে অবস্থান করছে তার উপর। কোণের উপর নির্ভর করে চৌম্বক বিভব শক্তির পরিমাণ ধনরাশি, ঋণরাশি অথবা শূন্য হতে পারে। চৌম্বকক্ষেত্র বরাবর মোট কৌণিক ভরবেগের অভিক্ষেপগুলি হল

$$m_J=J,\ J-1,\cdots -J+1,\ -J \qquad \cdots \qquad 5{\cdot}12$$

অর্থাৎ ঠিক 5·1 সূত্রের m_l পরিমাণগুলিরই মত। এথেকে সহজেই ধারণা করা সম্ভব যে বহিঃস্থ চৌম্বকক্ষেত্রের প্রভাবে পরমাণুর শক্তিস্তরগুলি $2J+1$ বিভিন্ন শক্তিস্তরে বিভক্ত হয়ে পড়বে। এই ধরণের স্তরবিভাজন যে স্টার্ন-গারলাখ পরীক্ষায় সরাসরি লক্ষ্য করা যায় তা আমরা আগেই উল্লেখ করেছি।

ঘূর্ণ ও কক্ষীয় কৌণিক ভরবেগের ঘূর্ণ চৌম্বক অনুপাত পরস্পর পৃথক এই কারণে ক্রিয়াশীল চৌম্বক ভ্রামক সাধারণতঃ এক বোর ভ্রামকের কোন

সহজে ঘূর্ণিতক হয় না। যেসব স্তরে একমাত্র কৌণিক ভরবেগ হ'ল কক্ষীয় কৌণিক ভরবেগ সেসব ক্ষেত্রে একক কৌণিক ভরবেগপিছু চৌম্বক ভ্রামকের পরিমাণ হয় ঠিক এক বোর ভ্রামক। এক্ষেত্রে g-গুণকের পরিমাণ $g=1$†। যেসব স্তরে শুধু ঘূর্ণিই চৌম্বক ভ্রামক সৃষ্টি করে সেসব ক্ষেত্রে প্রতি $\frac{1}{2}\hbar$ কৌণিক ভরবেগপিছু চৌম্বক ভ্রামকের পরিমাণ এক বোর ভ্রামক (আসলে এই পরিমাণ এক বোর ভ্রামকের তুলনায় সামান্য বেশী, তবে ঐ আধিক্যের পরিমাণ খুবই নগণ্য)। সুতরাং ইলেকট্রন ঘূর্ণির জন্য g-গুণকের মান হবে $g=2$।

ক্ষার বর্ণালীর জীম্যান প্রক্রিয়ার ফলাফল পরিমাণগতভাবে আলোচনা করার জন্য আমরা একটি গঠনকল্প প্রস্তাব করব যেখানে বহিঃস্থ ইলেকট্রনটির কক্ষীয় এবং ঘূর্ণিজনিত ভরবেগ সম্মিলিত হয়ে একটি মোট কৌণিক ভরবেগ সৃষ্টি করে। অপেক্ষাকৃত স্বল্প তীব্রতাসম্পন্ন চৌম্বকক্ষেত্রের জন্য এই গঠনকল্পটি নির্ভুল ফলাফল দিয়ে থাকে। এইভাবে সৃষ্ট মোট কৌণিক ভরবেগ চৌম্বকক্ষেত্রের চতুর্দ্দিকে লারমর (Larmor) অনুবর্ত্তন করে। 5·10 চিত্রে কক্ষীয় কৌণিক ভরবেগ নির্দ্দেশ করে $L^*\hbar$ ভেক্টরটি, এখানে $L^*=\sqrt{L(L+1)}$। তেমনি ঘূর্ণির জন্য $S^*\hbar$ ভেক্টরটি নির্দ্দেশ করা হয়েছে, $S^*=\sqrt{S(S+1)}$। এই দুটি ভেক্টর একত্রিত হয়ে মোট কৌণিক ভরবেগ সৃষ্টি করে যেটি হ'ল $J^*\hbar$ এবং $J^*=\sqrt{J(J+1)}$। এইভাবে ভেক্টরগুলির পরিমিতি নির্দ্দেশ করা আমাদের পূর্ব্বকথিত ভেক্টর গঠনকল্পের সঙ্গে অভিন্ন এবং এর দ্বারা কোয়াণ্টাম বলবিজ্ঞান প্রদত্ত ফলাফলগুলি উদ্ধার করা যায়। 5·10 চিত্রের ভেক্টর যোগকরণের ত্রিভুজে J^* এবং L^*-এর মধ্যে কোণ θ_1 এবং J^* ও S^*-এর মধ্যে কোণ θ_2 নিম্নলিখিত সূত্রের দ্বারা গণনা করা যায়

$$\cos\theta_1=\frac{J^{*2}+L^{*2}-S^{*2}}{2J^*L^*}$$

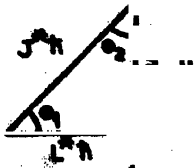
$$\cos\theta_2=\frac{J^{*2}+S^{*2}-L^{*2}}{2J^*S^*}$$

† কোয়াণ্টাম বলবিজ্ঞান অনুসারে পরমাণুর চৌম্বক ভ্রামক ভেক্টর নিম্নলিখিত সূত্রের দ্বারা প্রকাশিত

$$\mu_I=g_I\sqrt{I(I+1)}\,e\hbar/2m_ec=g_I I^*\mu_B$$

এবং এর অভিক্ষেপ $\mu_{m_I}=I=g_I I\frac{e\hbar}{2m_ec}=g_I I\mu_B$ এবং μ_B = এক বোর ভ্রামক

I হ'ল কৌণিক ভরবেগের চরম অভিক্ষেপের পরিমাণ এবং g_I একটি ধ্রুবরাশি যাকে বলা হয় g-গুণক। কক্ষীয় কৌণিক ভরবেগের ক্ষেত্রে যখন $I=1$, $g_I=1$। ঘূর্ণির ক্ষেত্রে $I=\frac{1}{2}$ কিন্তু $g_I=2$।

কক্ষীয় কৌণিক ভরবেগজাত চৌম্বক ভ্রামকের পরিমাণ প্রতি একক কৌণিক ভরবেগ পিছু এক বোর ভ্রামক অর্থাৎ আমরা L^*

চিত্র 5·10

হ'ল $L^*\mu_B$। ঘূর্ণজাত চৌম্বক ভ্রামক ভেক্টরের পরিমিতি $2S^*\mu_B$ এবং এটি S^*-এর দিক বরাবর থাকে। J^*-এর দিকে চৌম্বক ভ্রামকের পরিমাণ পেতে হলে আমরা ঐ দিক বরাবর কক্ষীয় এবং ঘূর্ণজাত ভ্রামকদ্বয়ের উপাংশগুলি যোগ করি, এথেকে আমরা পাই

$$\mu_J = L^*\mu_B \cos\theta_1 + 2S^*\mu_B \cos\theta_2$$

$$= \mu_B\left[\frac{J^{*2}+L^{*2}-S^{*2}}{2J^*}+\frac{J^{*2}+S^{*2}-L^{*2}}{J^*}\right]$$

$$= \mu_B\left[\frac{3J^{*2}+S^{*2}-L^{*2}}{2J^*}\right] \quad \cdots \quad 5·13$$

সুতরাং এইরকম একটি স্তর যার মোট কৌণিক ভরবেগ J, এর ক্ষেত্রে g-গুণকের মান হবে

$$g = \frac{\mu_J}{J^*\mu_B} = 1 + \frac{J^{*2}+S^{*2}-L^{*2}}{2J^{*2}}$$

$$= 1 + \frac{J(J+1)+S(S+1)-L(L+1)}{2J(J+1)} \quad \cdots \quad 5·14$$

g রাশিটিকে বলা হয় ল্যাণ্ড (Lande) বিচ্ছিন্নকরণ গুণক এবং এটি এর সঠিক প্রান্তিক পরিমাণগুলি প্রাপ্ত হয় অর্থাৎ $g=2$ যখন $L=0$, $J=S$ এবং $g=1$ যখন $S=0$, $J=L$। সুতরাং মোট ক্রিয়াশীল চৌম্বক ভ্রামক কোয়াণ্টাম সংখ্যা J-এর দ্বারা প্রকাশ করা যায়

$$\mu_J = J^*g\mu_B = g\mu_B\sqrt{J(J+1)} \quad \cdots \quad 5·15$$

কিন্তু 5·11 সূত্রানুসারে বহিঃস্থ কোন ক্ষেত্র B-এর ভিতর পরমাণুর বিভবশক্তি গণনা করতে B-এর দিকে কৌণিক ভরবেগ ভেক্টরের অভিক্ষেপগুলি নির্ণয় করতে হবে অর্থাৎ তখন J^*-এর স্থানে m_J রাশি ব্যবহার করতে হবে। যেহেতু এখন ক্রিয়াশীল চৌম্বক ভ্রামক প্রতি একক ভরবেগপিছু $g\mu_B$, ক্ষেত্রের ভিতর কোন একটি বিশেষ উপাংশ m_J-এর জন্য শক্তির পরিমাণ হবে

$$\Delta E = -m_J g\mu_B B \quad \cdots \quad 5·16$$

এই সূত্রটি যেকোন একটি শক্তিস্তরের বিভাজন নির্দেশ করে যেখানে L, S এবং J কোয়ান্টাম সংখ্যাগুলির অস্তিত্ব আছে এবং কৌণিক ভরবেগের যোগকরণ পূর্বোল্লিখিত পদ্ধতি অনুসারে ঘটে।

5'16 সূত্র এবং বিদ্যুৎ চুম্বকীয় বিকিরণের পরিচয়ন নীতিগুলির সাহায্যে আমরা বর্ণালীর জীম্যান বিভাজন বিস্তৃততররূপে প্রকাশ করতে সক্ষম হই। উদাহরণ হিসাবে সোডিয়ামের D-রেখাদ্বয়ের জীম্যান বিভাজন পর্য্যালোচনা করা যাক। এই রেখাদ্বয়ের উদ্ভব হয়, আমরা আগেই বলেছি, 3^2P স্তর থেকে 3^2S স্তরে পরাবর্তনের ফল হিসাবে। Z অক্ষ বরাবর স্থাপিত একটি চৌম্বকক্ষেত্রের দ্বারা শক্তিস্তরগুলি $2J+1$ অংশে বিভক্ত হবে এবং ঐসব স্তরগুলি থেকে পরাবর্তন নির্ভর করবে নিম্নলিখিত পরিচয়ন নীতির উপর

$$\Delta J = 0, \pm 1, \Delta L = \pm 1$$

এবং $\Delta m_J = 0$, বৈদ্যুতিক ছদন চৌম্বকক্ষেত্রের সমান্তরাল (π ছদন)

$\Delta m_J = \pm 1$, XY সমতলে বৃত্তাকার ছদন (σ ছদন)··· 5'17

চৌম্বকক্ষেত্র B-এর ভিতর ভূমিস্তরটি দুটি স্তরে বিভক্ত হয়ে যায় ($m_J = \pm \frac{1}{2}$) এবং এক্ষেত্রে $g = 2$, সুতরাং শক্তির পার্থক্য হবে

$$\Delta E_{^2S_{\frac{1}{2}}} = \pm \tfrac{1}{2}\, 2\mu_B B = \pm \mu_B B$$

^2P স্তরের নীচের স্তরটি অর্থাৎ $^2P_{\frac{1}{2}}$ স্তরটিতে

$$g = 1 + \frac{\frac{1}{2}.\frac{3}{2} + \frac{1}{2}.\frac{3}{2} - 2}{2.\frac{1}{2}.\frac{3}{2}} = \frac{2}{3}$$

সুতরাং চৌম্বকক্ষেত্রে শক্তির বিভাজন হবে

$$\Delta E_{^2P_{\frac{1}{2}}} = \pm \tfrac{1}{2}.$$

কিন্তু $^2P_{\frac{3}{2}}$ অবস্থায়

$$g = 1 + \frac{\frac{3}{2}.\frac{5}{2} + \frac{1}{2}.\frac{3}{2} - 2}{2.\frac{3}{2}.\frac{5}{2}} = \frac{4}{3}$$

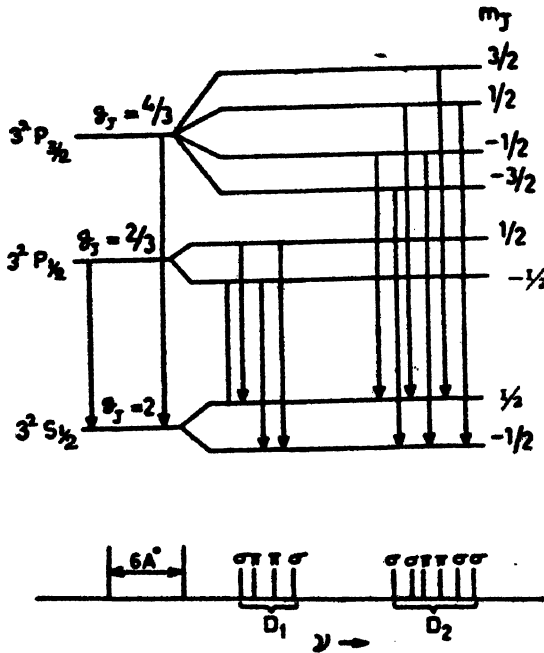
সুতরাং চৌম্বকক্ষেত্রে এই স্তরটির শক্তির বিভাজন হবে

$$\Delta E_{^2P_{\frac{3}{2}}} = (\pm \tfrac{3}{2}, \pm \tfrac{1}{2})\tfrac{4}{3}\mu_B B$$

স্তরগুলির বিভাজন 5'11 চিত্রে দেখা যাচ্ছে যদিও বিভাজনের পরিমাণ কোন নির্দিষ্ট অনুপাত অনুযায়ী আঁকা হয়নি। 5'11 চিত্রটির অনুরূপ জীম্যান প্রক্রিয়া লক্ষিত হয় যখন বর্ণালী চৌম্বকক্ষেত্রের সঙ্গে লম্বভাবে

পর্যবেক্ষণ করা যায়। লম্বভাবে পর্যবেক্ষণের দরুণ XY সমতলের বৃত্তাকার ছন্দন ঐদিকে সমতল ছন্দন সৃষ্টি করে যা চৌম্বকক্ষেত্রের সঙ্গে লম্বভাবে অবস্থান করে, এইগুলিই হ'ল চিত্রে প্রদর্শিত σ-ছন্দন। π-ছন্দনগুলি অবশ্য যথারীতি চৌম্বকক্ষেত্রের দিকের সঙ্গে সমান্তরালভাবে অবস্থান করবে। পরিচয়ন নীতিগুলির ক্রিয়ার ফলে D_1 রেখাটি চারটি রেখায় বিভক্ত হয় এবং D_2 রেখাটি বিভক্ত হয় ছয়টি রেখায়। D_1 রেখার বিভাজন নিম্নলিখিত সূত্রের দ্বারা প্রদত্ত

$$h\nu = h\nu_0 + (\Delta E_{^2P_{1/2}} - \Delta E_{^2S_{1/2}})$$

$$\nu = \nu_0 \pm \left(\frac{2}{3}, \frac{4}{3}\right)\frac{\mu_B B}{h} = \nu_0 \pm \left(\frac{2}{3}, \frac{4}{3}\right)\frac{eB}{4\pi mc}$$

চিত্র 5·11: কোয়ান্টাম বলবিজ্ঞানভিত্তিক সোডিয়াম D_1 ও D_2 রেখাদ্বয়ের ব্যতিক্রমিক জীম্যান প্রক্রিয়ার চিত্র।

$eB/4\pi mc$ এককে π-রেখাগুলির জন্য স্পন্দনাঙ্কের বিভাজন হয় $\pm \frac{2}{3}$ এবং σ-রেখাগুলির জন্য $\pm 4/3$। একইভাবে দেখান যায় যে D_2 রেখার বিভাজনে π রেখাগুলির জন্য স্পন্দনাঙ্কের তফাৎ হয় $\pm \frac{1}{3}$ এবং σ রেখাগুলির জন্য ± 1 এবং $\pm 5/3$। এই ধরনের বিভাজন মাঝামাঝি তীব্রতার চৌম্বকক্ষেত্রের ভিতর

লক্ষ্য করা যায় এবং এই প্রক্রিয়াটিকেই ব্যতিক্রমিক (anomalous) জীম্যান প্রক্রিয়া আখ্যা দেওয়া হয়।

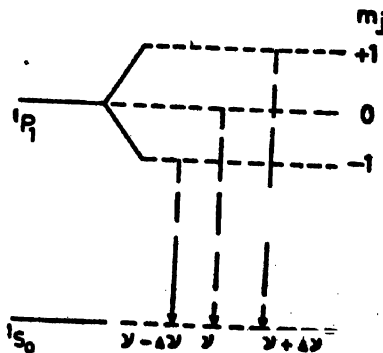
স্বাভাবিক বা সাধারণ জীম্যান প্রক্রিয়ার বিষয় আমরা পূর্বে উল্লেখ করেছি এবং ইলেকট্রন তত্ত্বের সাহায্যে এবং সনাতন পদার্থবিজ্ঞানের ভিত্তিতে তা ব্যাখ্যা করা হয়েছে। এখন উপরোক্ত আলোচনার ভিত্তিতে আমরা দেখতে চেষ্টা করি কিভাবে ঐ সরলতর প্রক্রিয়া সৃষ্টি হয়, কারণ উপরোক্ত আলোচনার ভিত্তিতে সাধারণতঃ অপেক্ষাকৃত অনেক জটিল প্রক্রিয়া আশা করা যায়। একটি দৃষ্টান্ত হিসাবে He-এর $^1P_1$ স্তর থেকে $^1S_0$ ভূমিস্তরে পরাবর্তন বিচার করা যেতে পারে, এক্ষেত্রে যে জীম্যান প্রক্রিয়া লক্ষিত হয় তা স্বাভাবিক জীম্যান প্রক্রিয়া। উভয় স্তরেই ইলেকট্রনদ্বয়ের সম্মিলিত ঘূর্ণ $S=0$। ভূমিস্তরটি চৌম্বকক্ষেত্রে অবিভক্ত থাকে কিন্তু উপরের $^1P_1$ স্তরটি তিনটি স্তরে বিভক্ত হয়ে যায় এবং এই স্তরত্রয়ের মধ্যে শক্তির ব্যবধান নিম্নলিখিত সূত্রের দ্বারা প্রকাশিত

$$\Delta E_{^1P_1} = \pm \mu_B B$$

যেহেতু এখানে $L=1$, $S=0$, সুতরাং $g=1$। এক্ষেত্রেও পরিচয়ন নীতিগুলি হ'ল

$$\Delta m_J = 0 \qquad \pi \text{ ছদন}$$

$$\Delta m_J = \pm 1 \qquad \sigma \text{ ছদন}$$

5.12 চিত্র থেকে সম্ভাব্য পরাবর্তনগুলি দেখা যাচ্ছে। অপরিবর্তিত ν স্পন্দনাঙ্কের রেখাটির Z দিক বরাবর ছদন রয়েছে এইজন্য ঐ দিক দিয়ে

চিত্র 5.12 : হিলিয়ামের $^1P_1 - {}^1S_0$ পরাবর্তনের ভিতর স্বাভাবিক জীম্যান প্রক্রিয়ার চিত্র।

দেখলে রেখাটি দেখা যায় না, এর দুপাশের দুটি রেখা যারমর স্পন্দনাঙ্ক $\Delta\nu = eB/4\pi mc$ দ্বারা কেন্দ্রীয় রেখাটি থেকে বিচ্ছিন্ন এবং এদের XY

সমতলে বৃত্তীয় ছদন থাকে। যদি চৌম্বকক্ষেত্রের সঙ্গে লম্বভাবে লক্ষ্য করা হয় তবে ν স্পন্দনাঙ্কের রেখাটির চৌম্বকক্ষেত্র বরাবর সমতল ছদন লক্ষিত হবে এবং এর দুপাশের দুটি রেখার চৌম্বকক্ষেত্রের সঙ্গে লম্বভাবে সমতল ছদন লক্ষিত হবে, অর্থাৎ বৈদ্যুতিক ভেক্টরটি ঐ দুই স্থলে চৌম্বক ক্ষেত্রের সঙ্গে লম্বভাবে অবস্থান করবে। আমরা দেখি যে সনাতন পদার্থবিজ্ঞান প্রদত্ত ফলাফল এক্ষেত্রে কার্য্যকরী এবং এর মূল কারণ হ'ল যে, এই বিশেষ ক্ষেত্রে ইলেকট্রন ঘূর্ণির কোন প্রভাব নেই। সুতরাং মোট ঘূর্ণি শূন্য এরকম দুটি স্তরের মধ্যে পরাবর্ত্তনের ক্ষেত্রেই স্বাভাবিক জীম্যান প্রক্রিয়া দৃষ্ট হতে পারে।

প্যাশেন-ব্যাক প্রক্রিয়া (Paschen-Buck effect)

অত্যধিক তীব্র চৌম্বকক্ষেত্রের ভিতর জীম্যান প্রক্রিয়ার কতগুলি পরিবর্ত্তন ঘটে। যে ব্যতিক্রমিক জীম্যান প্রক্রিয়া স্বল্পতর তীব্রতায় লক্ষ্য করা যায় তার ক্রমশঃ পরিবর্তন হতে থাকে, এবং শেষ পর্য্যন্ত অতিরিক্ত তীব্র চৌম্বক-ক্ষেত্রে তা পুনরায় স্বাভাবিক জীম্যান প্রক্রিয়ার আকৃতিতে পর্য্যবসিত হয়। অতিরিক্ত তীব্র চৌম্বকক্ষেত্রে যে পুনরায় স্বাভাবিক জীম্যান প্রক্রিয়ার আকৃতি ফিরে আসে এই পর্য্যবেক্ষণটিকে বলা হয় প্যাশেন-ব্যাক প্রক্রিয়া। এটির উদ্ভব হবার কারণ হ'ল এই যে, কক্ষীয় ও ঘূর্ণিজনিত কৌণিক ভরবেগগুলির মধ্যে পারস্পরিক আশ্লেষ (coupling) অতিরিক্ত তীব্রক্ষেত্রে সম্পূর্ণ ভেঙ্গে পড়ে। ক্ষেত্রবিহীন অবস্থাতেও সোডিয়ামের ^2P স্তরটি ঘূর্ণি ও কক্ষীয় কৌণিক ভরবেগের পারস্পরিক আশ্লেষের দরুণ কতগুলি উপস্তরে বিভক্ত থাকে (সূক্ষ্মবিভাজন), এই আশ্লেষ স্বাভাবিকভাবেই হ'ল একপ্রকার চৌম্বক আশ্লেষ কারণ কক্ষীয় এবং ঘূর্ণিজনিত ভ্রামকদ্বয়ের পারস্পরিক ক্রিয়ার দ্বারাই এর সৃষ্টি হয়। অতিরিক্ত তীব্র চৌম্বকক্ষেত্রে জীম্যান বিভাজন এবং কক্ষ-ঘূর্ণি আশ্লেষজনিত বিভাজন পরস্পরের তুলনীয় হয় এবং বহিঃস্থ ক্ষেত্রটির প্রভাব ক্রমশঃ অধিক হতে থাকে। পূর্ব্বে $\vec{L}$ ও $\vec{S}$ ভেক্টরদ্বয় একত্রিত হয়ে $\vec{J}$ ভেক্টরের সৃষ্টি করত যেটি চৌম্বকক্ষেত্রের চতুষ্পার্শ্বে অনুবর্ত্তন করত, কিন্তু ক্ষেত্রের তীব্রতা বৃদ্ধির সাথে সাথে $\vec{L}$ ও $\vec{S}$ ভেক্টরদ্বয়ের পারস্পরিক আশ্লেষের পরিমাণ ক্রমশঃ নগণ্য হয়ে যায়, এরা উভয়েই তখন স্বাধীনভাবে চৌম্বকক্ষেত্রের চতুষ্পার্শ্বে অনুবর্ত্তন করতে থাকে। ^2P স্তর এই অবস্থায় মোট ছয়টি স্তরে বিভক্ত হয়ে যায় এবং ঐ স্তরগুলি চিহ্নিত হয় m_L এবং m_S কোয়াণ্টাম সংখ্যাদ্বয়ের দ্বারা যেমন 5·15 চিত্রে দেখা যাচ্ছে। এক্ষেত্রে m_L এবং m_S-এর নিম্নলিখিত মানগুলি সম্ভব,

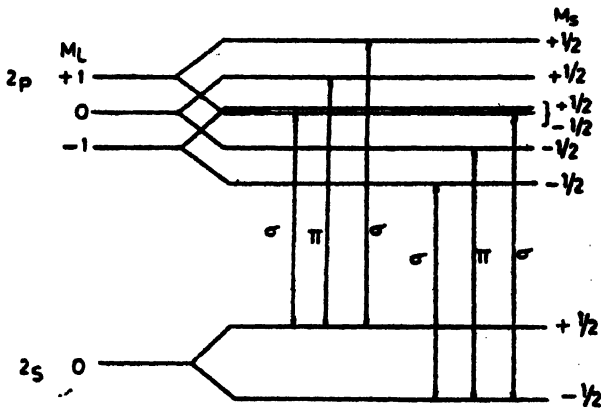
$$m_L = 0, \pm 1 ; m_S = \pm \tfrac{1}{2}$$

ক্ষেত্র বরাবর ক্রিয়াশীল চৌম্বক ভ্রামক তখন শুধু m_L এবং $2m_S$ যোর ভ্রামকের যোগফল, সুতরাং শক্তির বিভাজনের পরিমাণ একক্ষেত্রে

$$\Delta E' = (m_L + 2m_S)\mu_B B \quad \cdots \quad 5{\cdot}18$$

এই সূত্রটি থেকে (এবং 5·13 চিত্র) আমরা সহজেই বুঝতে পারি যে অতিরিক্ত তীব্র চৌম্বকক্ষেত্রে মাঝের দুটি স্তর প্রায় একত্রে মিলে যায় এবং এই অবস্থায় ^2P স্তরটি মোটামুটি পাঁচটি উপস্তরে বিভক্ত থাকে। আগের মতই ভূমিস্তরটি দুটি স্তরে বিভক্ত হয়ে যায়। এক্ষেত্রে পরাবর্ত্তন নিয়ন্ত্রণ করে নিম্নলিখিত পরিচয়ন নীতিগুলি

$$\Delta m_L = 0, \ \pm 1 \ ; \ \Delta m_S = 0 \quad \cdots \quad 5{\cdot}19$$

এইসব সূত্রের ফলাফল হল এই যে, মোটের উপর ছয়টি পরাবর্ত্তন ঘটে যেগুলি তিনটি মাত্র বিভিন্ন স্পন্দনাঙ্কে পর্য্যবসিত হয় যখন 5·18 ও 5·19 সূত্র ক্রিয়াশীল থাকে। সুতরাং শেষ পর্য্যন্ত প্রক্রিয়াটি স্বাভাবিক জীম্যান প্রক্রিয়ার মতই প্রতিভাত হয়।

চিত্র 5·13 : অত্যধিক তীব্র চৌম্বকক্ষেত্রে প্যাশেন-ব্যাক প্রক্রিয়ার পরাবর্ত্তনসমূহ।

পাউলি বর্জ্জন নীতি এবং পর্য্যায় সারণী (Pauli exclusion principle & periodic table)

এপর্য্যন্ত আমরা বিভিন্ন পরমাণুর বর্ণালী বিশ্লেষণ ক'রে দেখিয়েছি কিভাবে পদার্থবিজ্ঞানের কতগুলি নীতি এবং কোয়াণ্টাম তত্ত্ব প্রদত্ত কতগুলি ফলাফলের সাহায্যে এদের প্রাঞ্জল এবং নির্ভুল ব্যাখ্যা দেওয়া সম্ভব। হাইড্রোজেন বর্ণালীর ক্ষেত্রে গাণিতিক সমস্যা অপেক্ষাকৃত সরল এবং এর

পূর্ণ সমাধান সম্ভব, তা থেকে বর্ণালীর সমগ্র প্রকৃতিই নির্ধারিত হয়। অন্যান্য বর্ণালীর ক্ষেত্রে গাণিতিক তত্ত্বের প্রয়োগ অপেক্ষাকৃত কঠিন, কিন্তু তা সত্ত্বেও আমাদের পূর্বোক্ত আলোচনা যথেষ্ট সন্তোষজনক এবং নির্ভুল। পরমাণুর একটি ইলেকট্রনের চারটি কোয়ান্টাম সংখ্যা থাকে, n, l, m_l এবং m_s। পরে কোয়ান্টাম সংখ্যা j এবং m_j ব্যবহার করা হয়েছে কিন্তু তাতে নূতন প্রকল্প কিছু নেই, কারণ j, l ও s-এর সমষ্টিমাত্র। যেসব পরমাণুতে একাধিক ইলেকট্রন বর্ণালী সৃষ্টিতে অংশগ্রহণ করে, তাদের বর্ণালীর প্রকৃতি অবশ্যই অপেক্ষাকৃত অনেক জটিল। যেমন এরকম ঘটে কার্বনের পরমাণুতে, কার্বনের যোজ্যতা 4, যে চারটি ইলেকট্রন রাসায়নিক বিক্রিয়ায় অংশগ্রহণ করে সেগুলিই বর্ণালী সৃষ্টিতেও একত্রে অংশগ্রহণ করে। কার্বন পরমাণুর একটি শক্তিস্তর পেতে হলে উপরোক্ত চারটি ইলেকট্রনের বিভিন্ন l, s ইত্যাদি যোগ ক'রে ঐ স্তরের মোট J-এর পরিমাণ নির্ণয় করতে হয়। এই ধরণের গণনা তাত্ত্বিক দিক থেকে যথেষ্ট জটিল এবং এই কারণেই শক্তিস্তরগুলির কোয়ান্টাম প্রকৃতি ও এদের শক্তির পরিমাণ যথার্থভাবে নির্ধারণ করাও এসব ক্ষেত্রে কঠিন। কিন্তু এসব জটিলতা ছাড়াও কোয়ান্টাম বলবিজ্ঞানের আরও কয়েকটি নীতি আছে যাদের প্রয়োগ বিভিন্ন বর্ণালীর প্রকৃতি বিশ্লেষণ করার পক্ষে খুবই গুরুত্বপূর্ণ। এইরকম একটি নীতি হ'ল পাউলি বর্জ্জন নীতি। বিশেষ ক'রে যেসব পরমাণুতে একাধিক ইলেকট্রন বর্ণালী সৃষ্টিতে অংশগ্রহণ করে সেসব ক্ষেত্রে এই নীতির প্রয়োগ বর্ণালী বিশ্লেষণের পক্ষে অপরিহার্য্য।

ইলেকট্রনসমূহ এবং তাদের বিভিন্ন কোয়ান্টাম সংখ্যাগুলি সম্বন্ধে বিজ্ঞানী পাউলি কোয়ান্টাম তত্ত্বের একটি যুগান্তকারী নীতি উপস্থাপন করেন। পরমাণুস্থ ইলেকট্রনগুলির জন্য পাউলির প্রকল্পটি হ'ল এই: পরমাণুর ভিতর এমন কোন দুটি ইলেকট্রনের অস্তিত্ব থাকতে পারে না যাদের চারটি কোয়ান্টাম সংখ্যাই পরস্পর সমান।

এই বর্জ্জন নীতির ফলাফল পদার্থবিজ্ঞানে অত্যন্ত সুদূরপ্রসারী, পাউলি প্রথমে এই নীতিটি উত্থাপন করেন কিছু পরমাণুর বর্ণালীর কতগুলি বৈশিষ্ট্য লক্ষ্য করে। দেখা যায় যে, কোন কোন পরমাণুতে কতগুলি শক্তিস্তরের অস্তিত্ব থাকার কথা কিন্তু কোন কারণবশতঃ এরা অনুপস্থিত, অর্থাৎ বর্ণালীতে ঐ শক্তিস্তরগুলির আদৌ আবির্ভাব ঘটে না। উদাহরণহিসাবে ক্যালসিয়াম পরমাণুর কথা ধরা যায়, এই পরমাণুটির সবচেয়ে বাইরের কক্ষে দুটি ইলেকট্রন আছে এবং শুধু এরাই ক্যালসিয়াম বর্ণালী সৃষ্টিতে অংশগ্রহণ করে। লক্ষ্য করা যায় যে, যেসব ক্ষেত্রে ক্যালসিয়াম পরমাণুর একটি উত্তেজিত

শক্তিস্তরে উভয় ইলেকট্রনের সমস্ত কোয়াণ্টাম সংখ্যাগুলিই পরস্পর সমান, সেইসকল শক্তিস্তরগুলি বর্ণালীতে সম্পূর্ণ অনুপস্থিত থাকে। উদাহরণস্বরূপ ক্যালসিয়ামের উত্তেজিত S শক্তিস্তরগুলিতে (উভয় ইলেকট্রনের $l=0$) যদি উভয় ইলেকট্রনের n-এর পরিমাণ সমান হয় তাহলে তখন $J=1$ শক্তিস্তরগুলি বর্ণালীতে অনুপস্থিত থাকে। কারণ অবশ্য এই যে, সে অবস্থায় উভয় ইলেকট্রনের যাবতীয় কোয়াণ্টাম সংখ্যাগুলি পরস্পর সমান হয়ে যায়, অর্থাৎ তখন এরা পাউলি বর্জ্জন নীতি ভঙ্গ করে। নানা পরীক্ষায় প্রমাণিত হয়েছে যে পরমাণুবিজ্ঞানে পাউলি বর্জ্জন নীতি একটি অবশ্যম্ভাবী সর্ত্ত অর্থাৎ সমস্ত ক্ষেত্রেই এই নীতিটি অবশ্যই পালিত হবে। পাউলি বর্জ্জন নীতি কেবল যে ইলেকট্রনের ক্ষেত্রেই প্রযোজ্য তা নয়, প্রোটন এবং নিউট্রনও এই বর্জ্জন নীতি অনুসরণ করে।

পদার্থবিজ্ঞানের বিভিন্ন শাখায় পাউলি বর্জ্জন নীতির ব্যাপক প্রয়োগ হয়েছে, আমরা এখানে দেখাব কিভাবে মৌলগুলির পর্য্যায়সারণী এই নীতি অনুসরণ ক'রে গড়ে তোলা যায়। পর্য্যায়সারণীর বিষয় পূর্ব্বে বলা হয়েছে, মেণ্ডেলিয়েফ্ পর্য্যায়সারণী প্রথমে প্রস্তুত করেন মূলতঃ মৌলগুলির রাসায়নিক ধর্ম্মাবলীর ভিত্তিতে। আমরা দেখতে পাব যে পাউলি বর্জ্জন নীতি সাহায্যে মৌলগুলির এক পর্য্যায়সারণী প্রস্তুত করা যায় এবং এইভাবে প্রস্তুত সারণী ও মেণ্ডেলিয়েফের সারণী পরস্পর অভিন্ন। পাউলি বর্জ্জন নীতি দ্বারা প্রস্তুত পর্য্যায়সারণী সম্পূর্ণই পদার্থবিজ্ঞানভিত্তিক, এবং এর সাহায্যে আমরা মৌলগুলির রাসায়নিক ধর্ম্মাবলী পদার্থবিজ্ঞানের সার্ব্বজনীন নীতিগুলির সাহায্যে বিশ্লেষণ করতে পারি। পাউলি বর্জ্জন নীতি পরমাণুর ভিতর ইলেকট্রনগুলি কিভাবে সজ্জিত থাকে তাও বর্ণনা করে; এছাড়া পরমাণুদের চুম্বকত্ব, এদের সাধারণ বর্ণালী ও রঞ্জনরশ্মি বর্ণালী, এসব বিষয়ে যথার্থ জ্ঞান অর্জ্জনের পক্ষেও পাউলি বর্জ্জন নীতির প্রয়োগ অপরিহার্য্য।

যেহেতু কোন দুটি ইলেকট্রনের সমস্ত কোয়াণ্টাম সংখ্যাগুলি পরস্পর সমান হতে পারে না, পরমাণুস্থ প্রতিটি ইলেকট্রনই এক একটি স্বতন্ত্র কোয়াণ্টাম স্তরে অবস্থান করে। আমরা যদি এক এক ক'রে কেন্দ্রীনের আধান বাড়িয়ে যাই এবং সেই সঙ্গে কক্ষগুলিতে একটি একটি ক'রে ইলেকট্রন যোগ করতে থাকি, তবে এইভাবে বিভিন্ন মৌলের পরমাণুগুলি সৃষ্টি হতে থাকবে এবং তাদের ভিতর ইলেকট্রনগুলি পৃথক পৃথক কোয়াণ্টাম স্তরে সজ্জিত হয়ে উঠতে থাকবে। এভাবে আমরা পরমাণুর ভিতর ইলেকট্রনগুলি কিভাবে বিভিন্ন কোয়াণ্টাম স্তরে

সজ্জিত আছে তা জানতে পারি যা শুধুমাত্র রাসায়নিক পরীক্ষার ভিত্তিতে জানা সম্ভব নয়। প্রথমে আমরা প্রাথমিক কোয়াণ্টাম সংখ্যা $n=1$ থেকে শুরু করি, এইটিই প্রথম স্তর এবং প্রথম ইলেকট্রনটি এই স্তরে অবস্থান করবে। এক্ষেত্রে $l=0$ এবং $m_s=\pm\frac{1}{2}$। সুতরাং পাউলি বর্জন নীতির সাহায্যে আমরা বলতে পারি যে $n=1$ স্তরে সর্ব্বাধিক মাত্র দুটি ইলেকট্রন অবস্থান করতে পারে। তৃতীয় একটি ইলেকট্রন $n=1$ স্তরে কখনই অবস্থান করতে পারবে না কারণ তাহলে এর কোয়াণ্টাম সংখ্যাগুলি অপর দুটি ইলেকট্রনের কোন একটির কোয়াণ্টাম সংখ্যাগুলির সঙ্গে অভিন্ন হতে বাধ্য। এই অবস্থার প্রথম পরমাণু হাইড্রোজেন যার কক্ষে একটি ইলেকট্রন আছে, এবং দ্বিতীয় পরমাণু হিলিয়াম যার কক্ষীয় ইলেকট্রনের সংখ্যা দুই। এবার কেন্দ্রীনের আধান এক বাড়িয়ে সেই সঙ্গে তৃতীয় ইলেকট্রনটি যোগ করলে ঐটি $n=2$ স্তরে এসে অবস্থান করবে। সুতরাং হিলিয়ামে এসেই $n=1$ স্তরটি পূর্ণ হয়ে যায়। হিলিয়ামে ভূমিস্তরে যে দুটি ইলেকট্রন থাকে তাদের একটির $m_s=\frac{1}{2}$, অপরটির $m_s=-\frac{1}{2}$. সুতরাং পরমাণুটি $^1S_0$ অবস্থায় থাকে, এজন্য হিলিয়াম পরমাণুর মোট কৌণিক ভরবেগ ও চৌম্বক ভ্রামকের পরিমাণ শূন্য।

কোন একটি প্রাথমিক কোয়াণ্টাম সংখ্যার অধীনস্থ সমস্ত সম্ভাব্য ইলেকট্রনগুলি যখন ভর্ত্তি হয়ে যায় তখন সেগুলি একটি পূর্ণ "সেল"-এর জন্ম দেয়। কোয়াণ্টাম সংখ্যা $n=1$-এর অধীনে সর্ব্বাধিক দুটি ইলেকট্রন থাকতে পারে, সুতরাং প্রথম পূর্ণ সেলের ইলেকট্রন সংখ্যা দুই। দ্বিতীয় সেল শুরু হয় কোয়াণ্টাম সংখ্যা $n=2$ থেকে, এক্ষেত্রে $l=0$ এবং $l=1$ কক্ষীয় কৌণিক ভরবেগ সম্ভব, $l=0$ হলে $m_l=0$ এবং $l=1$-এর জন্য মোট m_l সংখ্যা 3। আবার প্রত্যেক m_l-এর জন্য দুটি ক'রে m_s কোয়াণ্টাম সংখ্যা থাকে। সুতরাং $n=2$ সেলে মোট ইলেকট্রনের সংখ্যা $2+3.2=8$। প্রত্যেক প্রাথমিক কোয়াণ্টাম সংখ্যা এক একটি নূতন সেলের জন্ম দেয় এবং যেকোন পূর্ণ সেলে ইলেকট্রনের সংখ্যা কত তা 5·1 সম্বন্ধগুলি ব্যবহার ক'রে সহজেই নির্ণয় করা যায়

$$N=\sum_l(2l+1)(2s+1)$$

$$=2[1+(2.1+1)+\cdots\cdots(2(n-1)+1)]$$

$$=2n^2 \qquad \cdots \qquad \cdots \qquad 5{\cdot}20$$

অর্থাৎ যে সেলে প্রাথমিক কোয়াণ্টাম সংখ্যা n সেই সেলে পরিপূর্ণ অবস্থায় মোট ইলেকট্রনের সংখ্যা $2n^2$। এই হিসাবে প্রথম সেলে ইলেকট্রনের সংখ্যা 2, দ্বিতীয় সেলে 8, তৃতীয় সেলে 18, চতুর্থ সেলে 32 এবং পঞ্চম সেলে 50। মোট মৌলের সংখ্যা 92 এজন্য পঞ্চম সেলটি অসম্পূর্ণ। বর্ত্তমানে অবশ্য কৃত্রিম উপায়ে পারমাণবিক সংখ্যা 92 থেকে 104 পর্য্যন্ত মৌলগুলি পরীক্ষাগারে প্রস্তুত করা সম্ভব হয়েছে, এদের সম্বন্ধে পরে আলোচনা করা হবে। প্রথম, দ্বিতীয়, তৃতীয় ও চতুর্থ সেলগুলিকে যথাক্রমে বলা হয় K, L, M এবং N সেল, তেমনি পরবর্ত্তী সেলগুলিকে যথাক্রমে O, P ইত্যাদি আখ্যা দেওয়া হয়। পূর্ণ সেলগুলিতে ইলেকট্রনগুলির সম্মিলিত কৌণিক ভরবেগ এবং চৌম্বক ভ্রামকের পরিমাণ শূন্য। এর কারণ অবশ্য সহজেই অনুমেয়, একটি পরিপূর্ণ সেলে যতগুলি ইলেকট্রনের কোয়াণ্টাম সংখ্যা m_l ঠিক ততগুলিরই কোয়াণ্টাম সংখ্যা $-m_l$, তেমনি m_s এবং $-m_s$ কোয়াণ্টাম সংখ্যাবিশিষ্ট ইলেকট্রনের সংখ্যাও পরস্পর সমান। এরা পরস্পর পরস্পরের প্রভাব খর্ব্ব করে অতএব সমগ্র সেলের মোট চৌম্বক ভ্রামক ও কৌণিক ভরবেগের পরিমাণ শূন্য। পরিপূর্ণ সেলের অস্তিত্ব এবং এদের এই বিশেষ প্রকৃতি পদার্থের রাসায়নিক ও ভৌত গুণাগুণগুলি নিয়ন্ত্রণের ব্যাপারে অত্যন্ত গুরুত্বপূর্ণ। পর্য্যায়সারণীর বিভিন্ন মৌলগুলির রাসায়নিক ধর্ম্মাবলীর পর্য্যায়ভবন এই পরিপূর্ণ সেলগুলির অবস্থিতির জন্যই সম্ভব হয়। পরিপূর্ণ সেলগুলি পরমাণুর ভিতর একটি প্রতিক্রিয়াবিহীন সুসংবদ্ধ অবস্থায় থাকে, বহিঃশক্তির প্রভাবে এরা সহজে প্রভাবিত হয় না, পরমাণুর আলোক বর্ণালী বিকিরণ কিংবা শোষণ, অথবা রাসায়নিক ক্রিয়াকলাপে এরা সাধারণতঃ কোন অংশগ্রহণ করে না। এই সেলগুলির বাইরে, সর্ব্ববহিঃস্থ আংশিক পূর্ণ সেলগুলিতে যেসব ইলেকট্রন থাকে সেগুলিই বর্ণালী সৃষ্টি এবং রাসায়নিক ক্রিয়াকলাপের জন্য দায়ী, যেমন পূর্ব্বে সোডিয়াম বর্ণালীর ক্ষেত্রে দেখান হয়েছে।

কিভাবে বিভিন্ন মৌলের ধর্ম্মাবলীর পর্য্যায়ভবন ঘটে তা কয়েকটি উদাহরণের সাহায্যে দেখান যেতে পারে। হাইড্রোজেনে একটি কক্ষীয় ইলেকট্রন আছে এবং হিলিয়ামে দুটি, হাইড্রোজেন ও হিলিয়ামের ইলেকট্রন সেলের গঠন যথাক্রমে $1s$ এবং $1s^2$, এইভাবে চিহ্নিত করা হয়। হিলিয়ামের পর লিথিয়ামে দ্বিতীয় সেলের প্রথম ইলেকট্রনটির আবির্ভাব হয়। লিথিয়ামের সেলগুলির গঠন হ'ল $1s^2\ 2s$। পরিপূর্ণ থাকার জন্য প্রথম সেলটি সম্পূর্ণ নিষ্ক্রিয়, দ্বিতীয় সেলের একটিমাত্র ইলেকট্রনের দ্বারাই বর্ণালীর

সৃষ্টি হয়। লিথিয়ামে যে L সেলটি শুরু হয়, আটটি ইলেকট্রন যুক্ত হবার পর নিওনে এসে সেটা শেষ হয়ে যায়। এরপর M সেলে এসে আমরা পাই এর প্রথম সভ্য সোডিয়াম, সোডিয়ামে K ও L সেলদ্বয় সম্পূর্ণ পূর্ণ এবং M সেলে একটিমাত্র ইলেকট্রন থাকে। সোডিয়ামের ইলেকট্রন বিন্যাস হ'ল $1s^2 2s^2 2p^6 3s^1$, সুতরাং সোডিয়াম বর্ণালী ঠিক লিথিয়াম বর্ণালীরই অনুরূপ হবে। সোডিয়াম থেকে শুরু করে M সেলটি ক্রমশঃ ভর্তি হতে থাকে এবং আর্গনে এসে মোট আটটি M সেল ইলেকট্রন যুক্ত হয়। কিন্তু আর্গনের পর M সেলটি আর পূর্ণ না হয়ে পরবর্তী ইলেকট্রনটি N সেলে উঠে আসে এবং আমরা পাই পটাশিয়াম (সারণী দ্রষ্টব্য)। M সেলের প্রাথমিক কোয়ান্টাম সংখ্যা 3 এবং এর অধীনে 18-টি ইলেকট্রন থাকার কথা কিন্তু মাত্র আটটি পূর্ণ হয়েই পরবর্তী ইলেকট্রন N সেলে এসে আশ্রয় নেয়। এরকম ঘটে তার কারণ বর্ণবিজ্ঞানের একটি নীতি অনুযায়ী পরমাণুর ভিতর প্রতিটি ইলেকট্রনই এমন কোয়ান্টাম সংখ্যাগুলি অর্জন করতে চায় যাতে এর বন্ধনশক্তির পরিমাণ সর্বাধিক হয়। বর্তমান ক্ষেত্রে M সেলে নবম ইলেকট্রনটি যুক্ত হলে পরমাণুটির যে মোট বিভবশক্তি হবে তার তুলনায় N সেলের প্রথম ইলেকট্রন হিসাবে যুক্ত হলে সেই শক্তির পরিমাণ হবে অপেক্ষাকৃত কম। এজন্যই M সেল পূর্ণ হবার আগেই পটাশিয়ামে N সেল $(n=4)$ শুরু হয়ে যায়। অবশ্য পটাশিয়ামের আংশিক পূর্ণ M সেলের ইলেকট্রন বিন্যাস প্রকৃতি $3s^2 3p^6$ এবং এই বিন্যাস-প্রকৃতির কোন মোট কৌণিক ভরবেগ থাকতে পারে না, এটিও একটি নিষ্ক্রিয় উপসেলের সৃষ্টি করে। পটাশিয়ামের একটিমাত্র $4s$ ইলেকট্রনই এর বর্ণালীর সৃষ্টির জন্য দায়ী এবং এই হেতু এর বর্ণালীও সোডিয়াম এবং লিথিয়ামের অনুরূপ। এইভাবে অন্যান্য ক্ষার ধাতুগুলি যেমন রুবিডিয়াম $(5s)$, সিজিয়াম $(6s)$ এবং ফ্রান্সিয়ামেও $(7s)$ একটিমাত্র s ইলেকট্রনই সবার বহিঃস্থ কক্ষে থাকে এবং বর্ণালী সৃষ্টির জন্য দায়ী হয়। এজন্য এদের বর্ণালী লিথিয়াম, সোডিয়াম কিংবা পটাশিয়ামের অনুরূপ। যাবতীয় ক্ষার ধাতুর রাসায়নিক প্রকৃতি অনেকটা একই রকম এবং অনুরূপ রাসায়নিক প্রকৃতির জন্যই এই ধাতুগুলিকে একত্রে ক্ষার ধাতু বলা হয়। এদের প্রত্যেকের রাসায়নিক যোজ্যতা যেহেতু এক, মেণ্ডেলিয়েফের পর্য্যায়সারণীতে এদের প্রথম বিভাগে রাখা হয়। হাইড্রোজেনের প্রকৃতিও অনেকটা অনুরূপ বলে হাইড্রোজেনকে এই বিভাগে রাখা হয়।

ক্ষার ধাতুগুলির ইলেকট্রন-বিন্যাস প্রকৃতি একই রকম হওয়ায় এদের বর্ণালী ও রাসায়নিক প্রকৃতির ভিতর যে সাদৃশ্য লক্ষ্য করা যায় অন্যান্য মৌলগুলির

ক্ষেত্রেও সেরকম সাদৃশ্য লক্ষ্য করা যায়। ধরা যাক, পর্য্যায় সারণীর দ্বিতীয় বিভাগের ক্ষার-মৃত্তিকা শ্রেণীর ধাতুগুলি—বেরিলিয়াম, ম্যাগনেশিয়াম, ক্যালশিয়াম, স্ট্রংশিয়াম, বেরিয়াম ও রেডিয়াম। এদের প্রত্যেকের অন্তঃস্থ সেলগুলি পূর্ণ অথবা নিষ্ক্রিয় বিন্যাসে থাকে। যেমন বেরিলিয়ামে K সেল সম্পূর্ণ পূর্ণ, L সেলে দুটি *s* ইলেকট্রন থাকে। ম্যাগনেশিয়ামে K এবং L সেল সম্পূর্ণ পূর্ণ, M সেলে দুটি *s* ইলেকট্রন থাকে। ক্যালশিয়ামে K ও L সেলদ্বয় সম্পূর্ণ পূর্ণ, M সেলে আটটি ইলেকট্রন আছে এবং এদের বিন্যাসপ্রকৃতির জন্য এই সেলটিও সম্পূর্ণ প্রতিক্রিয়াবিহীন, এর N সেলে দুটি *s* ইলেকট্রন থাকে, ইত্যাদি। ক্ষার-মৃত্তিকা শ্রেণীর ধাতুগুলির বর্ণালী এইভাবে দুটি বহিঃস্থ *s* ইলেকট্রনের দ্বারা সৃষ্টি হয় এবং এদের বর্ণালী এবং রাসায়নিক প্রকৃতি অনেকটা একই রকম এবং পর্য্যায় সারণীতে এরা একই বিভাগে থাকে। আমরা জানি যে মেণ্ডেলিয়েফের পর্য্যায় সারণীতে কোন একটি বিভাগের সংখ্যা ঐ বিভাগস্থ প্রত্যেকটি মৌলের সর্ব্বাধিক যোজ্যতার সমান। ক্ষার ও ক্ষার-মৃত্তিকা শ্রেণীর ধাতুগুলির ক্ষেত্রে আমরা দেখতে পেলাম যে বিভাগ সংখ্যা এবং ঐ বিভাগস্থ মৌলগুলির পরমাণুতে বর্ণালী সৃষ্টিকারী ইলেকট্রনগুলির সংখ্যা পরস্পর সমান। এথেকে প্রতীয়মান হয় যে, পরমাণুতে বর্ণালী সৃষ্টিকারী বহিঃস্থ ইলেকট্রনের সংখ্যা যত, এর রাসায়নিক যোজ্যতাও ঠিক তত। বিভিন্ন পরমাণুর ইলেকট্রন বিন্যাসের সঙ্গে পর্য্যায় সারণীতে এরা যে যে বিভাগগুলিতে আবির্ভূত হয় তাদের যোজ্যতা তুলনা করলেই উপরোক্ত মন্তব্যের সার্ব্বজনীন প্রয়োগশীলতা প্রতীয়মান হবে (5·3 সারণী)।

আরও একটি উদাহরণ হ'ল নিষ্ক্রিয় গ্যাসসমূহ, 5·2 সারণীতে বিভিন্ন নিষ্ক্রিয় গ্যাসের পরমাণুগুলির ইলেকট্রন বিন্যাসের একটি পৃথক তালিকা দেওয়া হয়েছে, এক্ষেত্রে দেখা যাচ্ছে যে এক হিলিয়াম ভিন্ন অন্যান্য নিষ্ক্রিয় গ্যাসের পরমাণুর সবচেয়ে বাইরের সেলের ইলেকট্রন বিন্যাস হল $ns^2\ np^6$ এবং এটিও একটি আবদ্ধ বিন্যাস। আবদ্ধ বিন্যাসবিশিষ্ট সেলের ইলেকট্রনগুলি রাসায়নিক ক্রিয়াশীল হয় না, এজন্য এই গ্যাসগুলি রাসায়নিক ক্রিয়ায় সম্পূর্ণ নিষ্ক্রিয়। নিষ্ক্রিয় গ্যাসগুলিতে সবসময় সবগুলি সেল সম্পূর্ণ পরিপূর্ণ অবস্থায় থাকে না, কিন্তু তাহলেও ইলেকট্রনের এইরূপ আবদ্ধ বিন্যাসই ঐসব পরমাণুর রাসায়নিক নিষ্ক্রিয়তার পক্ষে যথেষ্ট।

5·2 সারণী

বিভাগ 1

হাইড্রোজেন : $1s$
লিথিয়াম : $1s^2 2s$
সোডিয়াম : KL $3s$
পটাশিয়াম : KL $3s^2\ 3p^6\ 4s$
রুবিডিয়াম : KLM $4s^2\ 4p^6\ 4d^{10}\ 5s^2\ 5p^6 6s$
সিজিয়াম : KLM $4s^2\ 4p^6\ 5s$
ফ্রান্সিয়াম : KLMN $5s^2\ 5p^6\ 5d^{10}\ 6s^2\ 6p^6\ 7s$

বিভাগ 8

হিলিয়াম : $1s^2$
নিয়ন : $1s^2\ 2s^2\ 2p^6$ (KL)
আর্গন : KL $3s^2\ 3p^6$
ক্রিপটন : KLM $4s^2\ 4p^6$
জেনন : KLM $4s^2\ 4p^6\ 4d^{10}\ 5s^2\ 5p^6$
র‍্যাডন : KLMN $5s^2\ 5p^6\ 5d^{10}\ 6s^2\ 6p$

5·2 সারণীতে K, L ইত্যাদি অক্ষরের সাহায্যে বোঝান হয়েছে যে ঐ সকল সেলগুলি উপরোক্ত পরমাণুগুলিতে সম্পূর্ণরূপে পূর্ণ হয়ে আছে। এইভাবে পাউলি বর্জ্জন নীতি ব্যবহার ক'রে অন্যান্য সমস্ত মৌলেরই ইলেকট্রন বিন্যাস ব্যাখ্যা করা সম্ভব।

আগেই বলা হয়েছে যে সেলগুলিতে ইলেকট্রনগুলি অনেক সময়ই ক্রমান্বয়ে ভর্তি না হয়ে কোন একটি সেল সম্পূর্ণরূপে পূর্ণ হবার আগেই পরবর্ত্তী সেলে চলে যায়। পর্য্যায় সারণীতে অনেক জায়গাতেই এরকম ঘটনা দেখা যাচ্ছে। আর্গনের পর $3d^{10}$ উপস্তর পূর্ণ না হয়ে পটাশিয়ামে এসে $4s$ উপস্তর শুরু হয়ে যায় এবং এর অব্যবহিত পরে ক্যালশিয়ামে এই $4s^2$ উপস্তরটি পূর্ণ হয়। এরপর কিন্তু ইলেকট্রনগুলি আবার ফিরে এসে $3d^{10}$ উপস্তরটি ভর্ত্তি করতে থাকে, এখানে একের পর এক দশটি ইলেকট্রন যুক্ত হয় এবং আমরা স্ক্যানডিয়াম থেকে নিকেল পর্য্যন্ত পরাবর্ত্তন মৌলগুলি পাই। একই ব্যাপার ঘটে স্ট্রংশিয়ামের ($5s^2$) পর, তখন $5s^2$ উপস্তরটি পূর্ণ হবার পর ইলেকট্রনগুলি পুনরায় এসে $4d^{10}$ উপস্তরটি পূর্ণ করতে থাকে এবং এর ফলে ইট্রিয়াম থেকে ক্যাডমিয়াম পর্য্যন্ত দশটি মৌল পাওয়া যায়। এরপর বেরিয়ামে ($6s^2$) এসে আমরা দেখি N এবং O দুটি সেলই অর্দ্ধপূর্ণ অবস্থায় আছে। পরবর্ত্তী মৌল লান্থানামে O সেলে একটি $5d$ ইলেকট্রন প্রবেশ করে, এরপর কিন্তু আবার অভ্যন্তস্থ N সেলের $4f^{14}$ উপস্তরটি পূর্ণ হতে থাকে এবং তার ফলে সেরিয়াম থেকে ল্যুটেশিয়াম পর্য্যন্ত চৌদ্দটি ধাতু পাওয়া যায়, এই ধাতুগুলিকে বিরল মৃত্তিকা শ্রেণীর ধাতু নামে উল্লেখ করা হয়। এই ধাতুগুলিতে O এবং P সেল আংশিকভাবে পূর্ণ এবং একই ইলেকট্রন বিন্যাসে থাকে সুতরাং অভ্যন্তস্থ N সেল পূর্ণ হওয়াকালীন যে মৌলগুলি পাওয়া যায় তাদের রাসায়নিক প্রকৃতির

বিশেষ পার্থক্য হয় না। সেরিয়াম থেকে ল্যুটেশিয়াম পর্যন্ত মৌলগুলির রাসায়নিক গুণাগুণের পার্থক্য খুবই সামান্য এবং রাসায়নিক পরীক্ষা থেকে এইসব সিদ্ধান্তের সত্যতা প্রমাণিত হয়। এরপর হাফ্‌নিয়াম থেকে পারদ পর্য্যন্ত নয়টি মৌলে বাকী $5d$ ইলেকট্রনগুলি যুক্ত হতে থাকে এবং তারপরে থ্যেলিয়াম থেকে শুরু হয়ে $6p$ উপস্তর পূর্ণ হ'তে থাকে। রেডিয়ামে Q সেলের $(n=7)$ দুটি s ইলেকট্রন ভর্ত্তি হবার পর আবার এ্যাক্টিনিয়ামে এসে $6d$ উপস্তর পূর্ণ হতে থাকে। এরকম অনেক ক্ষেত্রেই দেখা যায় যে উপরের কোন কোন স্তর আগেই পূর্ণ হয়ে থাকে এবং তারপর অন্তঃস্থ কোন একটি অপূর্ণ উপস্তরে ইলেকট্রনগুলি একের পর সংযোজিত হতে থাকে। সুতরাং এথেকে বোঝা যায় যে শুধু পাউলি বর্জ্জন নীতির সাহায্যে একটি ইলেকট্রন কখন কোন স্তরে ভর্ত্তি হবে তা সবক্ষেত্রে বলা যায় না। পরীক্ষামূলক-ভাবে পরমাণুর ভিতর ইলেকট্রন বিন্যাস নির্ভুলভাবে জানা সম্ভব হয় বিভিন্ন প্রকারের বর্ণালী বিশ্লেষণ ক'রে। স্বাভাবিক বর্ণালী বিশ্লেষণ ক'রে জানা যায় কয়টি বহিঃস্থ ইলেকট্রন ঐ বর্ণালী সৃষ্টির জন্য দায়ী, এবং রঞ্জনরশ্মি বর্ণালী থেকে অন্তঃস্থ ইলেকট্রন বিন্যাস সম্বন্ধে জ্ঞাত হওয়া যায়। এভাবে প্রাপ্ত ইলেকট্রন বিন্যাসের সঙ্গে পর্য্যায় সারণীর ভিতরে মৌলগুলির সজ্জার সম্পূর্ণ সামঞ্জস্য রয়েছে এবং এথেকে পরমাণুবিজ্ঞানের কোয়ান্টাম প্রকল্পগুলির নির্ভুলতা ও সার্থকতা প্রমাণিত হয়।

৫·৪ সারণী

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
1	1H 1s^1							2H*e* 1s^2 (K)
2	3L*i* K2s^1	4B*e* K2s^2	5B K2$s^2$2p^1	6C K2$s^2$2p^2	7N K2$s^2$2p^3	8O K2$s^2$2p^4	9F K2$s^2$2p^5	10N*e* K2$s^2$2p^6(KL)
3	11N*a* KL3s^1	12M*g* KL3s^2	13A*l* KL3$s^2$3p^1	14Si KL3$s^2$3p^2	15P KL3$s^2$3p^3	16S KL2$s^2$3p^4	17C*l* KL3$s^2$3p^5	18A KL3$s^2$3p^6
4	19K KL3$s^2$3$p^6$4s^1	20C*a* KL3$s^2$3$p^6$4s^2	21S*c* KL3$s^2$3$p^6$3d^1 4s^2	22Ti KL3$s^2$3$p^6$3d^2 4s^2	23V KL3$s^2$3$p^6$3d^3 4s^2	24C*r* KL3$s^2$3$p^6$3d^5 4s^1	25M*n* KL3$s^2$3$p^6$3$d^5$4s^2	26F*e*27C*o*28N*i* KL3$s^2$3$p^6$3$d^6$4s^2 KL3$s^2$3$p^6$3$d^7$4s^2 KL3$s^2$3$p^6$3$d^8$4s^2
	29C*u* KL3$s^2$3p^6 3d^{10}4s^1	30Z*n* KL3$s^2$3p^6 3d^{10}4s^2 (KLM4s^2)	31G*a* KLM4$s^2$4p^1	32G*e* KLM4$s^2$4p^2	33A*s* KLM4$s^2$4p^3	34S*e* KLM4$s^2$4p^4	35B*r* KLM4$s^2$4p^5	36K*r* KLM4$s^2$4p^6
	37R*b* KLM4$s^2$4p^6 5s^1	38S*r* KLM4$s^2$4p^6 5s^2	39Y KLM4$s^2$4p^6 4$d^1$5s^2	40Z*r* KLM4$s^2$4p^6 4$d^2$5s^2	41C*b* KLM4$s^2$4p^6 4$d^4$5s^1	42M*o* KLM4$s^2$4p^6 4$d^5$5s^1	43M*a* KLM4$s^2$4$p^6$4$d^5$5s^2	44R*u*45R*h*46P*d* KLM4$s^2$4$p^6$4$d^7$5s^1 ....4$d^8$5s^1 KLM4$s^2$4$p^6$4d^{10}

5	47Ag KLM$4s^2 4p^6$ $4d^{10} 5s^1$	48Cd KLM$4s^2 4p^6$ $4d^{10} 5s^2$	49In KLM$4s^2 4p^6$ $4d^{10} 5s^2 5p^1$	50Sn KLM$4s^2 4p^6$ $4d^{10} 5s^2 5p^2$	51Sb KLM$4s^2 4p^6$ $4d^{10} 5s^2 5p^3$	52Te KLM$4s^2 4p^6$ $4d^{10} 5s^2 5p^4$	53I KLM$4s^2 4p^6$ $4d^{10} 5s^2 5p^5$	54Xe KLM$4s^2 4p^6 4d^{10}$ $5s^2 5p^6$ (Xe)
	55Cs (Xe)$6s^1$	56Ba (Xe)$6s^2$	57—71 বিরল মৃত্তিকা শ্রেণীর ধাতুসমূহ	72Hf (Xe)$4f^{14} 5d^2$ $6s^2$	73Ta (Xe)$4f^{14} 5d^3$ $6s^2$	74W (Xe)$4f^{14} 5d^4$ $6s^2$	75Re (Xe)$4f^{14} 5d^5 6s^2$	76Os77Ir78Pt (Xe)$4f^{14} 5d^6 6s^2$ (Xe)$4f^{14} 5d^7 6s^2$ (Xe)$4f^{14} 5d^9 6s^1$
6	79Au (Xe)$4f^{14} 5d^{10}$ $6s^1$	80Hg (Xe)$4f^{14} 4d^{10}$ $6s^2$	81Tl (Xe)$4f^{14} 5d^{10}$ $6s^2 6p^1$	82Pb (Xe)$4f^{14} 5d^{10}$ $6s^2 6p^2$	83Bi (Xe)$4f^{14} 5d^{10}$ $6s^2 6p^3$	84Po (Xe)$4f^{14} 5d^{10}$ $6s^2 6p^4$	85At (Xe)$4f^{14} 5d^{10}$ $6s^2 6p^5$	86Rn (Xe)$4f^{14} 5d^{10} 6s^2 6p^6$ (Rn)
7	87Fr (Rn)$7s^1$	88Ra (Rn)$7s^2$	89— এ্যাক্টিনাইড শ্রেণী					

এই সারণীতে কোন কোন মৌলের ক্ষেত্রে (Xe) ও (Rn) চিহ্নদ্বয় বোঝায় যে ঐসব মৌলের পরমাণুগুলির আভ্যন্তরীণ ইলেকট্রন সজ্জা Xe বা Rn-এর অনুরূপ।

বিরল মৃত্তিকা শ্রেণী

57 La $(Xe)\,5d^1 6s^2$	58 Ce $(Xe)4f^1 5d^1 6s^2$	59 Pr $(Xe)4f^2 5d^1 6s^2$	60 Nd $(Xe)4f^3 5d^1 6s^2$	61 Pm $(Xe)4f^4 5d^1 6s^2$
62 Sm $(Xe)4f^5 5d^1 6s^2$	63 Eu $(Xe)4f^6 5d^1 6s^2$	64 Gd $(Xe)4f^7 5d^1 6s^2$	65 Tb $(Xe)4f^8 5d^1 6s^2$	66 Dy $(Xe)4f^9 5d^1 6s^2$
67 Ho $(Xe)4f^{10} 5d^1 6s^2$	68 Er $(Xe)4f^{11} 5d^1 6s^2$	69 Tm $(Xe)\,4f^{12} 5d^1 6s^2$	70 Yb $(Xe)4f^{13} 5d^1 6s^2$	71 Lu $(Xe)4f^{14} 5d^1 6s^2$

এ্যাক্টিনাইড শ্রেণী *

89 Ac $(Rn)6d^1 7s^2$	90 Th $(Rn)5f^1 6d^1 7s^2$	91 Pa $(Rn)5f^2 6d^1 7s^2$	92 U $(Rn)5f^3 6d^1 7s^2$	93 Np $(Rn)5f^4 6d^1 7s^2$
94 Pu $(Rn)5f^5 6d^1 7s^2$	95 Am $(Rn)5f^7 7s^2$			

প্রশ্নমালা

(1) যদি হাইড্রোজেনের N সেল থেকে L সেলে পরাবর্ত্তন হয় তবে যে তরঙ্গদৈর্ঘ্য উৎপন্ন হবে তার পরিমাণ কত? এটি কোন শ্রেণীর অন্তর্ভুক্ত? [4862·8A°, বামার]

(2) Na বাষ্পের আয়নীভবন বিভব 5·13 ভোল্ট। সোডিয়ামের সর্ব্ববহিঃস্থ ইলেকট্রনের পরাবর্ত্তনের দ্বারা সর্ব্বনিম্ন কত তরঙ্গদৈর্ঘ্যের আলো নির্গত হতে পারে? [2422A°]

(3) k সংখ্যক ইলেকট্রনের একটি একত্র সংগঠন রয়েছে যার ভিতর প্রত্যেকটি ইলেকট্রনের n ও l কোয়াণ্টাম সংখ্যাদ্বয়ের মান পরস্পর সমান। ইলেকট্রনের এই ধরণের একত্র জমায়েৎকে nl^k চিহ্ন দ্বারা নির্দেশিত করা যায় যেখানে n প্রাথমিক ও l কৌণিক ভরবেগ কোয়াণ্টাম সংখ্যাকে নির্দেশ করে। k সংখ্যক ইলেকট্রনের এইরকম সংগঠনের ভিতর কোয়াণ্টাম সংখ্যাগুলির

* এই শ্রেণীর সমস্ত পরমাণুগুলির ইলেকট্রন বিন্যাস এখনও সম্পূর্ণ নির্ভুলভাবে জানা যায় না।

কত সংখ্যক বিভিন্ন বিতরণ সম্ভব ? বিশেষ ক্ষেত্রে, nd^3 সংগঠনের জন্য ঐ সংখ্যার পরিমাণ কত ?

সমাধান

অভিন্ন কোয়াণ্টাম সংখ্যা n ও l-এর জন্য মোট বিভিন্ন কোয়াণ্টাম অবস্থার সংখ্যা হ'ল $N = 2(2l+1)$। এই বিভিন্ন কোয়াণ্টাম অবস্থাগুলির মধ্যে k সংখ্যক ইলেকট্রনকে বিতরণ করতে গেলে অবশ্য আমাদের পাউলি বর্জ্জন নীতির সাহায্য নিতে হবে, অর্থাৎ কোন দুটি ইলেকট্রনেরই m_l ও m_s কোয়াণ্টাম সংখ্যাদ্বয় পরস্পর সমান হতে পারবে না। সুতরাং সমস্যাটি শেষ পর্য্যন্ত দাঁড়াচ্ছে, N সংখ্যক রাশিকে এককেবারে k সংখ্যক হিসাবে নিয়ে কতগুলি বিভিন্ন একত্রীকরণ হতে পারে। এই সংখ্যার পরিমাণ হ'ল

$$C_N^k = \frac{N(N-1)(N-2)\cdots\cdots(N-K+1)}{k\,!}$$

nd^3 সংগঠনের জন্য ঐ সংখ্যার পরিমাণ হবে,

$$C_N^{k} = 120.$$

(4) যেসব পরমাণুর একটিমাত্র যোজ্যতা ইলেকট্রন রয়েছে তাদের S, P, D স্তরগুলির ক্ষেত্রে লাণ্ড্ বিচ্ছিন্নকরণ রাশির মান কত হবে ?

[2 (S), $\frac{2}{3}$ এবং $\frac{4}{3}$ (P), $\frac{4}{5}$ এং $\frac{6}{5}$ (D)]

(5) স্টার্ন-গারলাথ পরীক্ষায় একটি সঙ্কীর্ণ রূপার পরমাণুর ধারা একটি অসমমাত্র চৌম্বকক্ষেত্রের মধ্য দিয়ে ঐ ক্ষেত্রের সঙ্গে লম্বভাবে অগ্রসর হয়, ক্ষেত্রের অসমমাত্রতার পরিমাণ হ'ল $\frac{\partial H}{\partial Z} = 10^5$ গস/সেমি। চৌম্বক-ক্ষেত্র সমন্বিত অঞ্চলের দৈর্ঘ্য $l_1 = 4$ সেমি এবং চুম্বক ও পর্দার মধ্যে দূরত্ব $l_2 = 10$ সেমি। ক্ষেত্রের দিক বরাবর ইলেকট্রনের চৌম্বক ভ্রামকের অভিক্ষেপ কত হবে নির্ণয় কর যদি পর্দার উপর ধারাটির বিচ্ছিন্নীকরণ (splitting) হয় $\Delta l = 2$ মিলিমিটার এবং পরমাণুগুলির গতিবেগ $v = 5 \times 10^4$ সেমি/সেকেণ্ড।

$$\left[\mu_H = mv^2 \Delta l \Big/ \left\{ l_1 \left(l_1 + 2l_2 \right) \frac{\partial H}{\partial Z} \right\} = 0{\cdot}93 \times 10^{-20} \text{ আর্গ/গস} \right]$$

(6) একটি সিজিয়াম পরমাণুর সঙ্কীর্ণ ধারা যার ভিতর পরমাণুগুলি সমস্তই ভূমিস্তরে অবস্থিত একটি তীব্র অসমমাত্র চৌম্বকক্ষেত্রের ভিতর দিয়ে অতিক্রান্ত হচ্ছে যার দৈর্ঘ্য 5 সেমি এবং পর্দাটি চুম্বকের কিনারা থেকে

10 সেমি দূরে অবস্থিত। লিথিয়াম পরমাণুর উপর ক্রিয়াশীল বলের পরিমাণ নির্ণয় কর যদি বিচ্ছিন্নীকরণের পরিমাণ হয় 2·5 মিলীমিটার, এবং প্রবাহ ধারার ভিতর পরমাণুদের গতিশক্তি 10^3 °K তাপমাত্রায় এদের গড় গতিশক্তির সমান হয়।

(7) ক্ষার পরমাণুদের ভূমিস্তরের শক্তির পরিমাণ তরঙ্গসংখ্যায় প্রকাশ কর যদি এদের আয়নীভবন বিভবের পরিমাণ হয় যথাক্রমে Li: 5·38V, N*a* 5·14V, K 4·33V, R*b* 4·17V এবং C*s* 3·89V।

[43320, 41390, 34860, 33570, 31320 সেমি$^{-1}$]

(8) নিম্নলিখিত আয়নীভবন বিভবের মানগুলি ব্যবহার ক'রে ঐসকল ক্ষেত্রে কোয়ান্টাম শূন্যীকরণ রাশিগুলি কত হবে নির্ণয় কর ; (1) Li-এর $2^2S_{\frac{1}{2}}$ স্তর, 5·38 ইভি, (2) N*a* এর $3^2S_{\frac{1}{2}}$ স্তর, 5·12 ইভি।

[(1) 0·41, (2) 1·37]

(9) সোডিয়ামের একজোড়া F স্তর থেকে একজোড়া D স্তরে পরাবর্ত্তনের শক্তিস্তর চিত্র অঙ্কন কর। এদের মধ্যে কোন রেখাটি নিষিদ্ধ এবং কেন?

[$3^2D_{\frac{3}{2}} - n^2F_{\frac{7}{2}}$ রেখাগুলি নিষিদ্ধ ; *j* পরিচয়ন নীতির জন্য]

ষষ্ঠ অধ্যায়

রঞ্জনরশ্মি

গত ঊনবিংশ শতাব্দীর শেষ দিকে জার্মান বিজ্ঞানী রঞ্জেন (Röentgen) একরকম তীব্র অন্তর্গমনক্ষম রশ্মি আবিষ্কার করেন। পরীক্ষায় রঞ্জেন লক্ষ্য করেন যে এই রশ্মি মানুষের শরীরের অংশ, কাগজ ও কিছু কিছু হাল্কা জিনিষপত্রের ভিতর দিয়ে চলে যেতে পারে। কোন কোন দীপনশীল পদার্থ যেমন বেরিয়াম প্ল্যাটিনোসায়ানাইড মাখান পর্দা এই রশ্মির গতিপথে রাখলে এর প্রভাবে ঐ পর্দার ভিতর উজ্জ্বল দীপনের সৃষ্টি হয়। প্রথম আবিষ্কারের সময় এই রশ্মির স্বরূপ সম্পূর্ণ অজ্ঞাত ছিল, এজন্য রঞ্জেন এর নাম দেন এক্স বা অজ্ঞাত রশ্মি। আবিষ্কারক রঞ্জেনের নামানুযায়ী একে রঞ্জেন রশ্মিও বলা হয়, বাংলা ভাষায় অনেকেই এই নামটির অপভ্রংশ হিসাবে রঞ্জনরশ্মি কথাটি ব্যবহার করেছেন এবং আমরাও এই রশ্মিকে ঐ নামেই অভিহিত করব।

পরবর্তী কালে রঞ্জনরশ্মির প্রকৃতি নির্ভুলভাবে বিশ্লেষণ করা সম্ভব হয়েছে এবং এ সম্বন্ধে আমরা পূর্ব্বে কিছু আলোচনা করেছি। রঞ্জনরশ্মি হ'ল আসলে সাধারণ আলোর মতই একপ্রকার তড়িৎ-চুম্বকীয় বিকিরণ, তবে এদের স্পন্দনাঙ্ক দৃশ্য আলোর স্পন্দনাঙ্কের তুলনায় বহুগুণ বেশী। আতসের সাহায্যে এই রশ্মিকে প্রতিসরিত করা যায় না, তবে ধাতুর পাতের উপর খাঁজ কেটে তৈরী করা বিশেষ ধরণের জালির সাহায্যে এদের তরঙ্গদৈর্ঘ্য নির্ণয় করা যায়। এছাড়া স্ফটিক ব্যতীচারের সাহায্যে কিভাবে রঞ্জনরশ্মির তরঙ্গদৈর্ঘ্য মাপা যায় আমরা তা পূর্ব্বে সবিস্তারে বর্ণনা করেছি, সেক্ষেত্রে স্ফটিকের জালিপ্রসার "d" এর পরিমাণ জানা থাকা দরকার। যেসব স্ফটিকের ভিতর পরমাণু সজ্জার প্রকৃতি জানা আছে তাদের ক্রিয়াশীল জালিপ্রসারের পরিমাণ সহজেই নির্ণয় করা যায়, স্ফটিকের ঘনত্ব এবং এটি যে পরমাণুতে গঠিত তার পারমাণবিক ভর এবং এ্যাভোগাড্রো সংখ্যা, এই রাশিগুলি থেকে জালিপ্রসারের পরিমাণ নির্ণয় করা সম্ভব। একটি সহজ উদাহরণের সাহায্যে এই মন্তব্যটি ব্যাখ্যা করা যেতে পারে। সোডিয়াম ক্লোরাইড স্ফটিকের ক্ষেত্রে রঞ্জনরশ্মি বিচ্ছুরণের পরীক্ষার দ্বারা নিশ্চিতভাবে প্রমাণ করা সম্ভব হয়েছে যে এর পরমাণু সজ্জার ভিতর এক-একটি একক চৌপলের কৌণিক বিন্দুগুলিতে সোডিয়াম এবং ক্লোরিন পরমাণুগুলি একের পর এক

সজ্জিত আছে, যেমন 3·9 চিত্রে দেখান হয়েছে, একটি সোডিয়াম ক্লোরাইড স্ফটিক এই ধরণের একক চৌপলের ক্রমিক ত্রিমাত্রিক সজ্জার দ্বারা গঠিত। স্পষ্টই বোঝা যায় যে একক চৌপলের একটি বাহুর দৈর্ঘ্য যদি d হয় তবে স্ফটিকের ভিতর প্রতিটি পরমাণুর সঙ্গে গড়ে d^3 পরিমাণের ঘনায়তন এবং ρd^3 পরিমাণের ভর সংশ্লিষ্ট থাকবে, এখানে ρ হ'ল স্ফটিকের ঘনত্ব, 2·165 গ্রাম/সেমি^{3}। আবার এক গ্রামঅণু পরিমাণ NaCl-এর ওজন 58·454 গ্রাম এবং এর ভিতর N_0 সংখ্যক অণু অথবা $2N_0$ সংখ্যক পরমাণু থাকে যেখানে N_0 হ'ল এ্যাভোগাড্রো সংখ্যা। গড়ে পরমাণু প্রতি ভরের পরিমাণ হবে $58{\cdot}454/2N_0$। সুতরাং

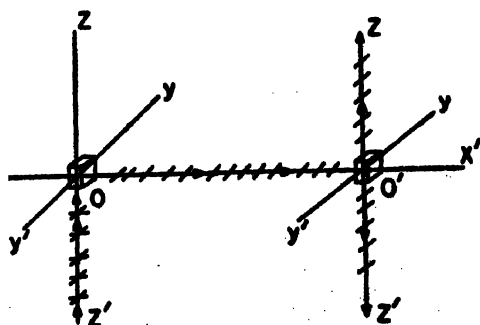
$$\rho d^3 = \frac{58{\cdot}454}{2N_0}$$

$$d = \left\{\frac{58{\cdot}454}{2(2{\cdot}165)(6{\cdot}025)10^{23}}\right\}^{\frac{1}{3}} = 2{\cdot}82\times10^{-8} \text{ সেমি.}$$

d-এর এই পরিমাণ ব্যবহার ক'রে ব্র্যাগের সূত্র (3·14 সূত্র) প্রয়োগ ক'রে পরীক্ষা দ্বারা রঞ্জনরশ্মির তরঙ্গদৈর্ঘ্য নির্ণয় করা যায়। খুব নির্ভুল পরিমাপের জন্য রঞ্জনরশ্মির তরঙ্গদৈর্ঘ্য সাধারণ জালির সাহায্যে মাপা হয়। এইভাবে মাপা রঞ্জনরশ্মির তরঙ্গদৈর্ঘ্যের এত নির্ভুল পরিমাণ আজকাল পাওয়া সম্ভব যে এদের সাহায্যে স্ফটিকের জালিপ্রসার ও এ্যাভোগাড্রো সংখ্যা অন্যান্য পদ্ধতির তুলনায় অনেক বেশী নির্ভুলভাবে নির্ণয় সম্ভব হয়েছে। এভাবে NaCl স্ফটিকের জালিপ্রসারের যে শুদ্ধতর পরিমাণ পাওয়া যায় তা হ'ল $2{\cdot}8197\times10^{-8}$ সেমি.। যে স্ফটিকটি আজকাল তরঙ্গদৈর্ঘ্যের পরীক্ষায় খুব বেশী ব্যবহৃত হয় তাহল $CaCO_3$, এর নির্ণীত জালিপ্রসারের পরিমাণ $3{\cdot}0356\times10^{-8}$ সেমি.। খুব ছোট তরঙ্গদৈর্ঘ্য থাকার ফলে রঞ্জনরশ্মির আলোককণাগুলি অনেক বেশী শক্তি বহন করে এবং এগুলি পদার্থের অভ্যন্তরে পরমাণু অথবা ইলেকট্রনের সঙ্গে সরাসরিভাবে ক্রিয়া করতে পারে, এইভাবে আলোক-বিদ্যুৎ প্রক্রিয়া ও কম্পটন প্রক্রিয়া সৃষ্টি হয়। বিশেষ ক'রে কম্পটন প্রক্রিয়া রঞ্জনরশ্মির একটি বৈশিষ্ট্য, দৃশ্য আলোর ক্ষেত্রে এই প্রক্রিয়া ঘটতে দেখা যায় না। কম্পটন প্রক্রিয়ায় পরমাণুস্থ ইলেকট্রন ও রঞ্জনরশ্মির আলোককণার মধ্যে সরাসরি সংঘর্ষ ঘটে এবং এই সংঘর্ষে শক্তি ও ভরবেগ সংরক্ষণ নীতি পালিত হয়, এই প্রক্রিয়াটি সম্বন্ধে একটু পরেই বিস্তৃতভাবে আলোচনা করা হবে। বিভিন্ন পদার্থ বিভিন্ন হারে রঞ্জনরশ্মি শোষণ করে, যেসমস্ত পদার্থের পরমাণুগুলির পারমাণবিক সংখ্যা অপেক্ষাকৃত অধিক সেগুলির

শোষণের পরিমাণও বেশী, এজন্য সীসা হ'ল একটি খুব ভাল রঞ্জনরশ্মি শোষক পদার্থ। মানুষের শরীরের ভিতর দিয়ে যাবার সময় শরীরের বিভিন্ন অংশ বিভিন্ন হারে রঞ্জনরশ্মি শোষণ করে। হাড়ের ভিতর ক্যালশিয়াম, ফস্‌ফরাস ইত্যাদি মৌলগুলি অধিক পরিমাণে থাকে, এদের পারমাণবিক সংখ্যা অপেক্ষাকৃত অধিক এজন্য মাংসপেশীর চেয়ে হাড়ের ভিতর রঞ্জনরশ্মি শোষিত হয় বেশী, এই কারণেই ফোটোগ্রাফীর প্লেটে হাড়ের ছবি মাংসপেশী থেকে স্বতন্ত্রভাবে ফুটে ওঠে।

রঞ্জনরশ্মির সমবর্ত্তন (Polarisation)

পূর্বেই বলা হয়েছে যে প্রথম আবিষ্কারের সময় রঞ্জনরশ্মির যথার্থ প্রকৃতি বিজ্ঞানীদের জ্ঞাত ছিল না, কেউ কেউ একে কণাপ্রবাহ, আবার কেউ কেউ বিদ্যুৎচুম্বকীয় বিকিরণ মনে করেছিলেন। বিদ্যুৎচুম্বকীয় বিকিরণ তির্য্যক্‌ অর্থাৎ এর তরঙ্গবিস্তার তরঙ্গপ্রবাহের দিকের সঙ্গে লম্বভাবে থাকে, এজন্য এর সমবর্ত্তন ঘটে এবং রঞ্জনরশ্মি যদি তড়িৎচুম্বকীয় বিকিরণ হয় তবে এরও সমবর্ত্তন হবে। রঞ্জনরশ্মির সমবর্ত্তন পরীক্ষার দ্বারা প্রথম প্রদর্শন করেন বিজ্ঞানী বার্কলা (Barkla) এবং এভাবে সর্ব্বপ্রথম এই রশ্মির তড়িৎচুম্বকীয় প্রকৃতি নিঃসন্দেহে প্রমাণিত হয়। যে আলোতে আলোকপ্রবাহের তরঙ্গ সম্মুখের উপর প্রতিটি রশ্মির তরঙ্গবিস্তার ভেক্টরগুলি নির্দ্দিষ্ট দিকে স্পন্দিত বা আবর্ত্তিত হতে থাকে তাকে সমবর্ত্তিত আলো আখ্যা দেওয়া হয়। স্বাভাবিক আলোর (অসমবর্ত্তিত) মধ্যে যদি স্পন্দনশীল বৈদ্যুতিক ক্ষেত্রের

চিত্র 6·1 : রঞ্জনরশ্মির সমবর্ত্তনের পরীক্ষা।

ভেক্টর যেকোন দুই পরস্পর লম্ব অংশে বিশ্লিষ্ট ক'রে ফেলা যায় তবে সেক্ষেত্রে এই দুটি পরস্পর লম্ব অংশের মধ্যে দশার পার্থক্য হয় সম্পূর্ণ অনির্দ্দেশিত, সমতল সমবর্ত্তিত আলো বলতে বোঝায় সেই আলো যার মধ্য থেকে এই

দুই পরস্পর লম্ব অংশের মধ্যে একটিকে কোন না কোন উপায়ে সম্পূর্ণরূপে সরিয়ে দেওয়া হয়েছে এবং অপরটি অন্ততঃ আংশিকভাবে বজায় আছে।

রঞ্জনরশ্মির সমবর্তনের পরীক্ষায় আয়োজনটি 6·1 চিত্রে বোঝান হয়েছে, প্রথমে রঞ্জনরশ্মি Z-দিকে অগ্রসর হয়ে একটি বিক্ষুরক O থেকে বিক্ষুরিত হচ্ছে, O বিক্ষুরকের উপর আপতিত রশ্মি সমবর্তিত নয় কিন্তু বিক্ষুরিত রশ্মি যা প্রাথমিক গতিপথের সঙ্গে লম্বভাবে XX′ দিকে অগ্রসর হচ্ছে, সেই রশ্মিটি সমবর্তিত। তড়িৎচুম্বকীয় বিকিরণ তত্ত্ব অনুসারে আপতিত রশ্মির স্পন্দনশীল বৈদ্যুতিক ক্ষেত্রের প্রভাবে বিক্ষুরকের ভিতর ইলেকট্রনগুলি ত্বরিত হয় এবং এই ত্বরিত ইলেকট্রনগুলি পুনরায় চতুর্দিকে একই স্পন্দনাঙ্কের আলো বিকিরণ করতে থাকে, এইভাবেই X′ দিকে অগ্রসরমান বিক্ষুরিত রশ্মি সৃষ্টি হয়। প্রথমাবস্থায় যে সমতল তরঙ্গসম্মুখ O বিক্ষুরকের উপর পড়ে তার ভিতর XX′ এবং YY′ উভয়দিকে স্পন্দনশীল তরঙ্গ বিস্তারের অস্তিত্ব থাকে, কিন্তু ইলেকট্রনগুলি যেদিকে ত্বরিত হয় সেই বিশেষ দিকে কোন বিকিরণ করে না, সুতরাং আপতিত রশ্মির তরঙ্গ বিস্তারের XX′ অংশের দ্বারা X′ দিকে কোন বিকিরণ ঘটতে পারে না। ঐদিকে বিকিরণ ঘটে শুধু YY′ অংশের দ্বারা। যেহেতু আপতিত প্রতিটি রশ্মির জন্যই এই প্রক্রিয়াটি ঘটে এজন্য X′ দিকে অগ্রসরমান বিক্ষুরিত রশ্মি সমবর্তিত হয়, এক্ষেত্রে প্রতিটি রশ্মির তরঙ্গ বিস্তার YZ সমতলে থেকে YY′ দিক বরাবর স্পন্দিত হতে থাকে অর্থাৎ এই বিক্ষুরিত আলো হয় সমতল সমবর্তিত। সুতরাং বিক্ষুরিত রশ্মি যখন O′ বিক্ষুরকের উপর এসে পড়ে তখন সেখানে ইলেকট্রনগুলি ত্বরিত হয় শুধু YY′ দিকে, সুতরাং ঐ বিশেষ দিকে এদের দ্বারা বিকিরণের পরিমাণ হয় শূন্য, যদিও সমতল সমবর্তিত রশ্মি Z অথবা Z′ দিকে পুনরায় বিক্ষুরিত হয়। সুতরাং একটি আয়নীভবন কক্ষ বা রঞ্জনরশ্মির তীব্রতা পরিমাপ করতে পারে, এটিকে যদি O′ বিক্ষুরকের নিকট Z অথবা Z′ দিকে রাখা হয় তবে এটি এই দ্বিতীয়বার বিক্ষুরিত রশ্মির অস্তিত্ব নির্দেশ করবে, কিন্তু Y অথবা Y′ দিকে পরিলক্ষিত বিক্ষুরিত রশ্মির তীব্রতা হবে শূন্য। বার্কলার পরীক্ষাতেও স্পষ্ট দেখা যায় যে, O′ বিক্ষুরকের নিকট Z অক্ষ বরাবর বিক্ষুরিত রশ্মির তীব্রতা চরম থাকে, কিন্তু Z অক্ষের দিক থেকে Y অক্ষের দিকে গেলে ক্রমশঃ এই তীব্রতা হ্রাস পেতে থাকে এবং Y অক্ষের উপর তীব্রতা হয় খুবই সামান্য। এইভাবে প্রমাণিত হয় যে, রঞ্জনরশ্মির সমবর্তন ঘটে অর্থাৎ এই রশ্মি সাধারণ আলোর মতই তির্যক্ তরঙ্গের প্রবাহ মাত্র।

রঞ্জনরশ্মি বিকিরণ পদ্ধতি

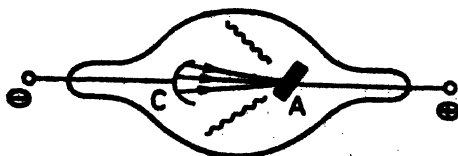
রঞ্জনরশ্মি উৎপাদনের মূল নীতি হ'ল কোন উপায়ে কিছু ইলেকট্রনকে ত্বরিত ক'রে সেই ত্বরিত ইলেকট্রনের প্রবাহকে কোন পদার্থের উপর নিক্ষেপ করা। তখন ঐ পদার্থের ভিতর ইলেকট্রনগুলি প্রতিত্বরিত হয়ে রঞ্জনরশ্মি বিকিরণ করে। কোন কেন্দ্রীনের অতি নিকটে তীব্র বৈদ্যুতিক ক্ষেত্রের দ্বারা বিকর্ষিত হবার ফলেই ইলেকট্রনগুলির এইপ্রকার প্রতিত্বরণ ঘটে। প্রতিত্বরণের ফলে ইলেকট্রনটির গতিশক্তি হ্রাস পায়, এটি তখন যে বিকিরণের জন্ম দেয় তার স্পন্দনাঙ্ক নিম্নলিখিত সর্তের দ্বারা প্রকাশিত

$$h\nu = \text{প্রাথমিক গতিশক্তি} - \text{প্রান্তিক গতিশক্তি} \qquad 6{\cdot}1$$

যেহেতু ইলেকট্রনগুলি একবার প্রতিত্বরিত হয়ে যেকোন প্রান্তিক শক্তিতে পৌঁছুতে পারে, বিকিরিত রশ্মির স্পন্দনাঙ্কগুলি সেজন্য সন্ততভাবে বিতরিত থাকে এবং উৎপন্ন সর্ব্বাধিক স্পন্দনাঙ্ক শুধু প্রাথমিক গতিশক্তি অর্থাৎ নলের ভিতর বিভব ব্যবধানের উপর নির্ভর করে। ত্বরিত ইলেকট্রনের প্রাথমিক গতিশক্তি নিম্নলিখিত সূত্রের দ্বারা প্রকাশিত

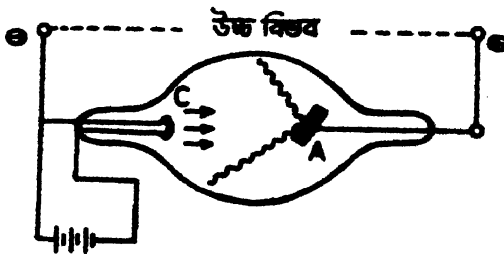
$$\text{গতিশক্তি} = m_0c^2 \left| \frac{1}{\left(1-\frac{v^2}{c^2}\right)^{-\frac{1}{2}}} \right| = Ve \qquad 6{\cdot}2$$

এখানে V, নলের ভিতর প্রযুক্ত বিভব ব্যবধানের পরিমাণ। এক্ষেত্রে ইলেকট্রনের গতিশক্তির জন্য আপেক্ষিকতাতত্ত্ব প্রদত্ত সূত্রটি ব্যবহার করা বাঞ্ছনীয় কারণ অপেক্ষাকৃত অল্প ত্বরক বিভবেই ইলেকট্রনের গতিশক্তি আপেক্ষিকতাস্তরে পৌঁছে যেতে পারে। ইলেকট্রন বা কোন আহিত কণাকে ত্বরিত বা প্রতিত্বরিত করার ফলে যে বিকিরণের সৃষ্টি হয় তাকে বলা হয় ব্রেমস্ট্রাহ্‌লুঙ্‌ (bremsstrahlung) বা ত্বরণ বিকিরণ।

সচরাচর পরীক্ষাগারে দুই রকম পদ্ধতিতে রঞ্জনরশ্মি উৎপন্ন করা হয়,

চিত্র 6·2 : রঞ্জনরশ্মি উৎপাদনের গ্যাসপূর্ণ নল পদ্ধতি।

একটিকে বলা হয় গ্যাসপূর্ণ নল পদ্ধতি, অপরটির নাম শূন্য নল পদ্ধতি। খুব অল্প চাপে গ্যাসপূর্ণ নলের ভিতর বিদ্যুৎমোক্ষণ ঘটিয়ে ক্যাথোডরশ্মি বা ঋণ-বিদ্যুৎধারক রশ্মি

উৎপাদনের বিষয় আগে বলা হয়েছে। এই ঋণ-বিদ্যুৎধারক রশ্মি আসলে ত্বরিত ইলেকট্রনের প্রবাহ ছাড়া আর কিছুই নয়, সুতরাং একে পদার্থের উপর নিক্ষেপ ক'রে রঞ্জনরশ্মি উৎপন্ন করা যায়। গ্যাসপূর্ণ নলের দ্বারা রঞ্জনরশ্মি উৎপাদনের পদ্ধতি 6·2 চিত্রের আয়োজনে দেখান হয়েছে। এখানে ঋণ-বিদ্যুৎধারক C হ'ল একটি বাঁকান ধাতুর পাত যার ভিতর থেকে ইলেকট্রনগুলি উৎপন্ন হয়ে ধন-বিদ্যুৎধারক A-র উপর এসে পড়ে, C ও A-র মধ্যে বিভব ব্যবধান সাধারণতঃ 50,000 থেকে 200,000 ভোল্টের মধ্যে থাকে। A হ'ল ট্যাংস্টেনের তৈরী একটি পাত, এটি তীব্র তাপসহ, অনেক যন্ত্রের আয়োজনে A পাতটি ঠাণ্ডা করার জন্য এর ভিতর জল সঞ্চালনের নল লাগান থাকে। A-র স্থানে বিভিন্ন মৌলের তৈরী পাত রেখে ঐ সব মৌলের রঞ্জনরশ্মি বর্ণালী উৎপন্ন করা যায়। নলের ভিতর চাপের পরিমাণ থাকে সাধারণতঃ 0·01 থেকে 0·001 মিলিমিটার পারদের উচ্চতার সমান। ইলেকট্রনগুলি ঋণ-বিদ্যুৎধারকের ভিতর থেকে লম্বভাবে উৎপন্ন হয়, এজন্য এটিকে সুবিধামত বাঁকিয়ে ইলেকট্রনগুলিকে নির্দিষ্ট বিন্দুতে ফোকাস করা সম্ভব। উৎপন্ন রঞ্জনরশ্মি আলোককণার চরম শক্তি নির্ভর করে C ও A-র মধ্যে বিভব ব্যবধানের উপর।

শূন্য নল পদ্ধতিতে নলের ভিতর ইলেকট্রন উৎপাদন করা হয় উচ্চ-তাপমাত্রা সৃষ্টি ক'রে (6·3 চিত্র) এবং ঐ ইলেকট্রনগুলিকে নির্দিষ্ট বিভব

চিত্র 6·3 : শূন্য নল পদ্ধতি।

ব্যবধানে ত্বরিত করা হয়, নলের অভ্যন্তর প্রায় সম্পূর্ণ বায়ুশূন্য থাকে (নলের অভ্যন্তরের চাপের পরিমাণ হয় 1/10,000 মিলিমিটার পারদের সমান)। ইলেকট্রন উৎপাদনকারী ফিলামেন্টের ভিতর বিদ্যুৎপ্রবাহের পরিমাণ কমিয়ে বাড়িয়ে নলের ভিতর ইলেকট্রন প্রবাহের পরিমাণ নিয়ন্ত্রিত করা সম্ভব। এই পদ্ধতিতে সুবিধা হ'ল এই যে, উৎপন্ন ইলেকট্রনের সংখ্যা শুধুমাত্র ঋণ-বিদ্যুৎ-ধারকের তাপমাত্রার উপর নির্ভরশীল, নলের অভ্যন্তরের বিভব ব্যবধানের

উপর তা নির্ভর করে না, অর্থাৎ নলের ভিতর বিদ্যুৎপ্রবাহের পরিমাণ যেকোন ত্বরক বিভবের জন্যই সমান রাখা সম্ভব।

অতীব শক্তিশালী ত্বরিত ইলেকট্রন উৎপাদনের অন্যান্য পদ্ধতির বিষয় পরে বলা হবে, ঐসব পদ্ধতিতে উৎপন্ন ইলেকট্রনের দ্বারা আঘাত ক'রে কয়েক' এমইভি পর্য্যন্ত শক্তিশালী রঞ্জনরশ্মি আলোককণা উৎপাদন করা সম্ভব। উপরিলিখিত দুটি পদ্ধতির সাহায্যে উৎপন্ন রঞ্জনরশ্মি আলোককণার শক্তি সাধারণতঃ এক এমইভির চেয়েও অনেক কম থাকে।

পরমাণুর রঞ্জনরশ্মি বিকিরণ

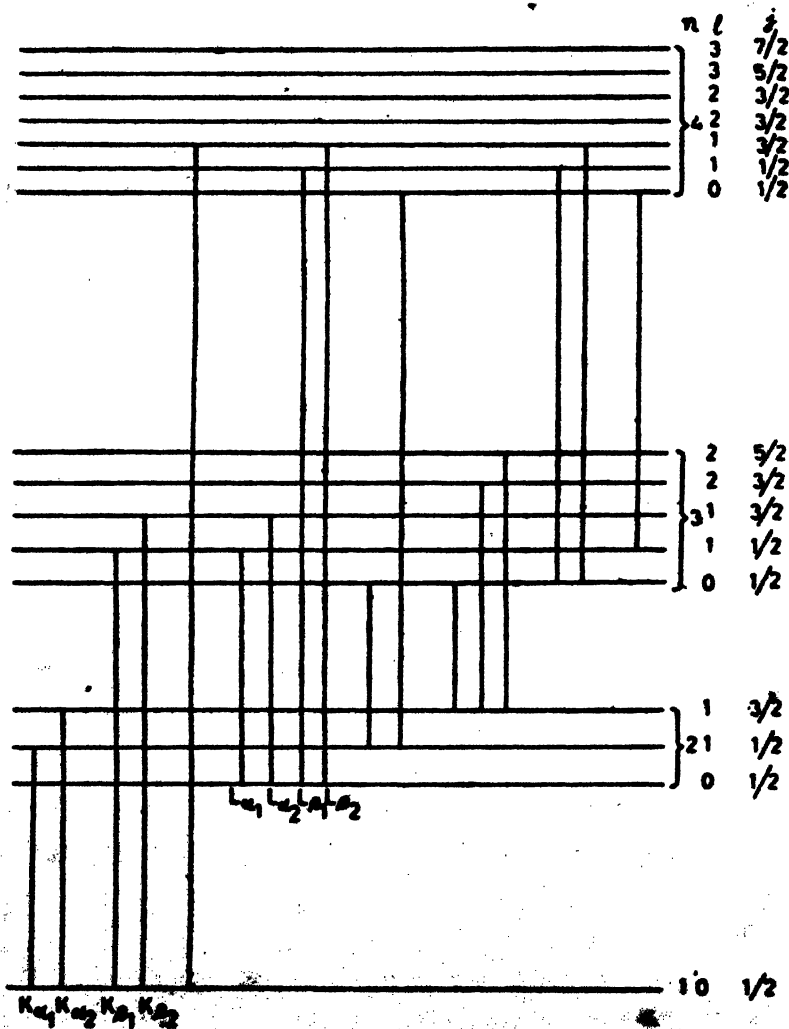
ত্বরণ বিকিরণ ছাড়া আরও একধরণের রঞ্জনরশ্মি বিকিরণ সম্ভব, সেক্ষেত্রে পরমাণুগুলি উত্তেজিত হয়ে নিজেরাই রঞ্জনরশ্মি বিকিরণ ক'রে থাকে। পরমাণুর অভ্যন্তরে ইলেকট্রনের বিভিন্ন পূর্ণ সেল সম্বন্ধে আমরা পূর্ব্ববর্ত্তী অধ্যায়ে আলোচনা করেছি, প্রতি সেলে ইলেকট্রনগুলির একটি প্রাথমিক কোয়াণ্টাম সংখ্যা থাকে যা ঐ সেলের সবগুলি ইলেকট্রনের ক্ষেত্রেই সমান। ইলেকট্রনের শক্তি মুখ্যতঃ নির্ভর করে এদের প্রাথমিক কোয়াণ্টাম সংখ্যার উপর, অর্থাৎ একই সেলের বিভিন্ন ইলেকট্রনগুলির মধ্যে শক্তির যে তারতম্য হয় তার পরিমাণ দুটি পৃথক সেলের মধ্যে শক্তির যে ব্যবধান থাকে তার তুলনায় অনেক কম। যদি উচ্চশক্তিবিশিষ্ট ইলেকট্রনের একটি ধারা পদার্থের উপর এসে পড়ে তবে এদের আঘাতে পরমাণুর বিভিন্ন সেলের ভিতর থেকে এক বা একাধিক ইলেকট্রন উৎখাত হয়ে যেতে পারে। যেকোন একটি সেলের ভিতর থেকে একটি ইলেকট্রন ছিটকে বাইরে বেরিয়ে আসতে পারে। মনে করা যাক K-সেলের একটি ইলেকট্রনকে এইভাবে উৎখাত করা হয়েছে ; তখন K-সেলে একটি শূন্যতা (hole) সৃষ্টি হবে এবং পরমাণুটি একটি আয়নে পরিণত হবে। কিন্তু K-সেলের এই অসম্পূর্ণতা বেশীক্ষণ বজায় থাকে না, বাইরের কোন একটি সেল থেকে একটি ইলেকট্রন অল্প সময়ের মধ্যেই K-সেলে নেমে আসে, ইলেকট্রনের এইপ্রকার পরাবর্ত্তনের ফলে রঞ্জনরশ্মি উৎপন্ন হয়। যদি L-সেলের একটি ইলেকট্রন K-সেলে নেমে আসে তবে যে রঞ্জনরশ্মি আলোকণা সৃষ্টি হয় তার স্পন্দনাঙ্ক হবে

$$\nu_{K\alpha} = \frac{E_L - E_K}{h} \qquad 6{\cdot}3$$

E_K এবং E_L হ'ল যথাক্রমে K এবং L সেলে একটি ইলেকট্রন উৎখাত হলে আয়নটি যে শক্তিস্তরে উপনীত হয় তার পরিমাণ। এইপ্রকার সূত্রের সাহায্যে যেকোন একটি সেল থেকে অপর একটি সেলে ইলেকট্রন পরাবর্ত্তনজাত

রঞ্জনরশ্মির স্পন্দনাঙ্ক গণনা করা যায়। 6·4 সূত্রটি বোর তত্ত্বের 3·14 সর্তের সঙ্গে অভিন্ন এবং আমরা একটু পরেই দেখতে পাব যে বোর তত্ত্ব রঞ্জনরশ্মি বিকিরণের ক্ষেত্রেও মোটামুটি প্রযোজ্য এবং এই তত্ত্বের প্রয়োগের দ্বারা E_K, E_L ইত্যাদি রাশিগুলির পরিমাণ নির্ণয় করা যায়।

রঞ্জনরশ্মি বর্ণালীর সঠিক ব্যাখ্যা শুধু কোয়ান্টাম বলবিজ্ঞানের প্রয়োগের দ্বারাই দেওয়া সম্ভব। পূর্বে আমরা দেখেছি যে পাউলি বর্জন নীতির ক্রিয়াশীলতার জন্য পরমাণুর ভিতর একটি পরিপূর্ণ সেলের ইলেকট্রনগুলির মোট

চিত্র 6·4 : ভারী পরমাণুর রঞ্জনরশ্মি শক্তিস্তরসমূহ।

কক্ষীয় কৌণিক ভরবেগ এবং মোট ঘূর্ণির পরিমাণ শূন্য। এজন্য একটি পরিপূর্ণ সেল থেকে একটি ইলেকট্রন উৎখাত হয়ে গেলে সেই সেলের অবশিষ্ট ইলেকট্রনগুলির মিলিত কক্ষীয় কৌণিক ভরবেগের পরিমাণ হয় ঐ উৎখাত ইলেকট্রনটির কক্ষীয় কৌণিক ভরবেগের সমান কিন্তু বিপরীতমুখী। ঘূর্ণির ক্ষেত্রেও একই ঘটনা ঘটে। সুতরাং ঐ সেলের অবশিষ্ট ইলেকট্রনগুলির মিলিত কক্ষীয় কৌণিক ভরবেগের অর্থাৎ L-এর মান হবে ঐ উৎখাত ইলেকট্রনটির l-এর সমান, এবং এদের মিলিত মোট কৌণিক ভরবেগ J-এর মান হবে ঐ l-এর মানের $\frac{1}{2}$ বেশী বা $\frac{1}{2}$ কম। প্রতিটি (n, L, J) মান একত্রে আয়নিত পরমাণুর এক-একটি শক্তিস্তরকে নির্দেশ করে। K-সেলে আয়নীভবন ঘটলে যে শক্তিস্তরটি উৎপন্ন হয় সেটি হ'ল $1S_{\frac{1}{2}}$, L-সেলে $(n=2)$ একটি ইলেকট্রন উৎখাত হলে $2S_{\frac{1}{2}}$, $2P_{\frac{1}{2}}$ ও $2P_{\frac{3}{2}}$, মোট এই তিনটি শক্তিস্তর উৎপন্ন হতে পারে; M-সেলে একটি ইলেকট্রন উৎখাত হলে মোট পাঁচটি শক্তিস্তরের যেকোন একটি সৃষ্টি হতে পারে, এগুলি হ'ল যথাক্রমে $3S_{\frac{1}{2}}$, $3P_{\frac{1}{2}}$, $3P_{\frac{3}{2}}$, $3D_{\frac{3}{2}}$ এবং $3D_{\frac{5}{2}}$, ইত্যাদি। এই শক্তিস্তরগুলির প্রতিটির শক্তি পৃথক, 6·4 চিত্রে এদের দেখান হয়েছে যদিও চিত্রটি বাস্তব অনুপাত অনুযায়ী আঁকা হয়নি, আসলে কোয়াণ্টাম সংখ্যা n-এর দরুণ শক্তিভেদের পরিমাণ হবে আরও অনেক বেশী। এক্ষেত্রে, যেহেতু $L=l$, $S=s$ এবং $J=j$; শক্তিস্তরগুলি উৎখাত ইলেকট্রনের কোয়াণ্টাম-সংখ্যাগুলির মাধ্যমেও প্রকাশ করা যায় এবং সেভাবেই 6·4 চিত্রে এদের নির্দেশ করা হয়েছে। রঞ্জনরশ্মি বিকিরণের ক্ষেত্রে পরাবর্ত্তন নীতিগুলি নিম্নরূপ

$$\Delta l = \pm 1$$

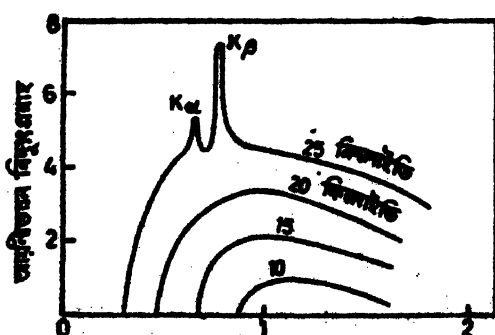
$$\Delta j = 0, \pm 1$$

Δn-এর যেকোন পরিমাণ হতে পারে, তবে $\Delta n=0$ পরাবর্ত্তনগুলি ঘটতে দেখা যায় না। 6·4 চিত্রে রঞ্জনরশ্মির পরাবর্ত্তন লম্ব রেখাগুলির দ্বারা বোঝান হয়েছে। বিভিন্ন সেল থেকে উদ্গত রঞ্জনরশ্মি রেখাগুলির বিভিন্ন নামকরণ হয়ে থাকে, $L \rightarrow K$ পরাবর্ত্তনকে বলা হয় K_α রেখা, $M \rightarrow K$ পরাবর্ত্তনের নাম দেওয়া হয়েছে K_β রেখা; তেমনি $M \rightarrow L$ রেখাকে বলা হয় L_α রেখা $N \rightarrow L$, L_β, ইত্যাদি।

মনে করা যাক L-সেল থেকে K-সেলে একটি ইলেকট্রন নেমে আসার ফলে K_α রেখাদ্বয়ের সৃষ্টি হয়েছে; যেহেতু L সেলটি অসম্পূর্ণ, এবার পুনরায় M অথবা N সেল থেকে L সেলে পরাবর্ত্তন ঘটবে, এর ফলে L_α, L_β, L_γ, L_δ রেখাগুলির সৃষ্টি হবে এবং এই রকম ভাবে প্রতিটি অসম্পূর্ণ সেল

থেকেই পরবর্তী সেলে পরাবর্তন ঘটতে থাকবে। অর্থাৎ একটি K_{α} রেখা সৃষ্টি হলে সঙ্গে সঙ্গে আরও একাধিক রঞ্জনরশ্মি বিকিরণ বর্ণালীর রেখা সৃষ্টি হবে। বিভিন্ন পরীক্ষায় রঞ্জনরশ্মি বিকিরণের এই গঠনকল্প নির্ভুল প্রমাণিত হয়েছে।

পরমাণুর রঞ্জনরশ্মি বর্ণালী এবং সাধারণ বর্ণালী বিকিরণ পদ্ধতির পার্থক্য লক্ষণীয়, রঞ্জনরশ্মি বর্ণালী সৃষ্টি হয় অন্তঃস্থ ইলেকট্রনগুলির উত্তেজনার দ্বারা, এক্ষেত্রে পরমাণুর একটি অন্তঃস্থ সেলে একটি শূন্যতা সৃষ্টি হওয়া অবশ্য প্রয়োজন। আলোক বর্ণালী সৃষ্টি হয় সর্ববহিঃস্থ যোজ্যতা ইলেকট্রন-গুলির উত্তেজনার দ্বারা, এক্ষেত্রে পরমাণুর আয়নীভবণ ঘটার কোন প্রয়োজন হয় না। পাউলি বর্জন নীতির ক্রিয়াশীলতার জন্য একটি পরিপূর্ণ সেলের ভিতর ইলেকট্রন সংখ্যা নির্দিষ্ট, এই নির্দিষ্ট সংখ্যার চেয়ে বেশী ইলেকট্রন ঐ সেলে থাকতে পারে না। এজন্য অপর কোন সেল থেকে ঐ সেলে ইলেকট্রন পরাবর্তন সম্ভব নয়, শুধু যদি কোন প্রক্রিয়ার ফলে অন্তঃস্থ সেলের একটি ইলেকট্রন উৎখাত হয় তবেই ঐ শূন্যস্থানে অপর কোন সেল থেকে একটি ইলেকট্রন নেমে আসতে পারে।

পরীক্ষাগারে উৎপন্ন রঞ্জনরশ্মির বর্ণালীতে উপরোক্ত দুই প্রকারের বিকিরণই একত্রে মিশে থাকে, 6·5 চিত্রে একটি পরীক্ষালব্ধ বর্ণালীর প্রকৃতি দেখান হয়েছে। এখানে দেখা যাচ্ছে যে উৎপন্ন রঞ্জনরশ্মির ভিতর

চিত্র 6·5 : প্রযুক্ত বিভব ব্যবধানের অপেক্ষক হিসাবে দুই ধাতব থেকে উৎপন্ন রঞ্জনরশ্মির বর্ণালী এবং তীব্রতা।

বিভিন্ন তরঙ্গদৈর্ঘ্যের বিকিরণের তীব্রতা সন্তভাবে বিস্তারিত, শুধু কোন কোন অঞ্চলে অত্যধিক বিকিরণের জন্য কতগুলি শিখর সৃষ্টি হয়েছে।

6.5 চিত্রটি মলিবিডেনামের রঞ্জনরশ্মি বর্ণালীর চিত্র, বিভিন্ন লেখগুলি এখানে আপতিত ইলেকট্রনের বিভিন্ন প্রাথমিক শক্তিকে নির্দেশ করে এবং আয়নীভবন বিদ্যুৎপ্রবাহ কোন ইচ্ছাধীন এককে মাপা হয়েছে। স্পষ্টই দেখা যায় যে মলিবিডেনাম ধাতবহের উপর 25 কিলোইভি শক্তির নিক্ষিপ্ত ইলেকট্রনের জন্য মলিবিডেনাম পরমাণুর রঞ্জনরশ্মি বর্ণালীর K_α ও K_β রেখাদ্বয়ের সৃষ্টি হয়, কিন্তু 20, 15 বা 10 কিলোইভি শক্তিতে বর্ণালীর ভিতর কোন শিখরের অস্তিত্ব নেই। এইভাবে প্রাপ্ত বর্ণালীর লেখচিত্রে একটি শিখরের অস্তিত্ব থাকার অর্থ হ'ল যে, ঐ বিশেষ তরঙ্গদৈর্ঘ্যে ত্বরণ বিকিরণ ছাড়া পরমাণুর অভ্যন্তরে ইলেকট্রন পরাবর্তনের দ্বারাও রঞ্জনরশ্মি উৎপন্ন হচ্ছে, এইজন্যই ঐ বিশেষ তরঙ্গদৈর্ঘ্যে উৎপন্ন রঞ্জনরশ্মির তীব্রতা সহসা অতিরিক্ত বৃদ্ধি পায়। যেহেতু K_α, K_β রেখাগুলি মলিবিডেনাম পরমাণুর উত্তেজনার ফলে সৃষ্টি হয়, এথেকে প্রতীয়মান হয় যে 20 কিলোভোল্ট ত্বরকবিভবে মলিবিডেনামের K সেলের ইলেকট্রনগুলিকে উৎখাত করা যায় না। অবশ্য 6·4 চিত্রের পরাবর্তনের বিবরণ থেকে আমরা আশা করি যে K_α ও K_β রেখাদ্বয়ের ভিতর সূক্ষ্ম বিভাজন থাকবে, তবে পরীক্ষার আয়োজন উন্নত ধরণের না হলে সব সময় এই সূক্ষ্ম বিভাজন লক্ষ্য করা যায় না। প্রত্যেক প্রকার অপেক্ষাকৃত ভারী মৌলের জন্যই এইরকম রঞ্জনরশ্মি বর্ণালীর তীব্রতার লেখচিত্র অঙ্কন করা সম্ভব। যে বিশেষ পদার্থের বর্ণালী বিশ্লেষণ করা প্রয়োজন, ক্ষরণ-নলের ধন-বিদ্যুৎ ধারকের উপর সেই পদার্থের একটি পাত রাখা হয়; ত্বরিত ইলেকট্রনগুলি এই পাতের উপর আপতিত হয়ে যে রঞ্জনরশ্মি উৎপন্ন করে তা ব্র্যাগ বর্ণালী মাপনী বা ঐ-জাতীয় কোন আয়োজনের সাহায্যে বিশ্লেষণ করা হয়। একটি নির্দিষ্ট ত্বরক বিভবে উৎপন্ন রঞ্জনরশ্মির তীব্রতা বিভিন্ন তরঙ্গদৈর্ঘ্যের অপেক্ষক হিসাবে মেপে 6·5 লেখচিত্রের আকারে প্রদর্শন করলে যেসকল বিশেষ তরঙ্গদৈর্ঘ্যে ঐ পদার্থের পরমাণুগুলি রঞ্জনরশ্মি বিকিরণ করে সেগুলিতে এক একটি শিখর লক্ষিত হবে। K_α রেখাগুলির স্পন্দনাঙ্ক মাপলে দেখা যায় যে বিভিন্ন মৌলের ঐ রেখাগুলির স্পন্দনাঙ্কের ভিতর একটি সহজ সম্বন্ধ বিদ্যমান, একই রকম সহজ সম্বন্ধ দেখতে পাওয়া যায় বিভিন্ন K_β রেখাগুলির মধ্যেও; এখন আমরা এইসব সম্বন্ধগুলির বিষয় কিছু আলোচনা করব।

মোজলির সূত্র (Moseley's law)

1913 খৃষ্টাব্দে ইংরাজ বিজ্ঞানী মোজলি ব্যাপক পরীক্ষার ফলে দেখতে পান যে বিভিন্ন মৌলের K_α রেখাগুলির স্পন্দনাঙ্ক একটি

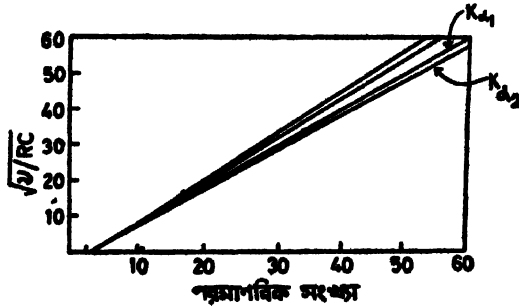
সহজ সূত্রের সাহায্যে প্রকাশ করা যায়; মোজলির পরীক্ষালব্ধ সূত্রটি হ'ল নিম্নরূপ

$$\sqrt{\nu}=a(Z-b) \qquad 6\cdot5$$

এখানে Z পরীক্ষাধীন মৌলের পারমাণবিক সংখ্যা এবং a ও b দুটি ধ্রুবক; অর্থাৎ পরীক্ষাধীন সমস্ত মৌলের ক্ষেত্রেই এদের পরিমাণ সমান। কিন্তু K_a রেখাটি সূক্ষ্ম বিভাজিত, এর ভিতর দুটি বিভিন্ন স্পন্দনাঙ্কের অস্তিত্ব রয়েছে, পরীক্ষার দেখা যায় K_{a1} এবং K_{a2} উভয় রেখাসমষ্টির জন্যই 6·5 সূত্রের মত এক একটি পৃথক সূত্র লেখা যায়, এই সূত্রের লেখ 6·6 চিত্রে দেখান হয়েছে, একই ভাবে বিভিন্ন মৌলের $K_{\beta1}$ অথবা $K_{\beta2}$ রেখাগুলির জন্যও ঐ সূত্রের অনুরূপ একটি সূত্র লেখা যায়। এইসব বিভিন্ন সূত্রের পার্থক্য শুধু এই যে বিভিন্ন ক্ষেত্রে আবির্ভূত ধ্রুবকদ্বয় a ও b-এর মান পৃথক, 6·6 লেখটি থেকেই এই বিষয়টি স্পষ্টরূপে প্রতিভাত হবে।

মোজলির আবিষ্কার অত্যন্ত গুরুত্বপূর্ণ কারণ এর সাহায্যে বিভিন্ন মৌলগুলিকে চিহ্নিত করার একটি সহজ উপায় পাওয়া গেল। অবশ্য আমরা জানি মৌলগুলির রাসায়নিক প্রকৃতি অনুসারেও এদের পৃথক পৃথক ভাবে চিহ্নিত করা যায় এবং এইভাবেই পর্য্যায়সারণী প্রস্তুত করা হয়েছে, এই সারণীতে প্রত্যেকটি মৌলেরই এক একটি বিশেষ পৃথক স্থান আছে কারণ প্রতিটি মৌল অন্যান্য মৌলগুলির তুলনায় রাসায়নিক প্রকৃতির দিক থেকে অন্ততঃ কিছুটা পৃথক। কিন্তু এভাবে অনেক সময় অসঙ্গতির সৃষ্টি হয়, ধরা যাক কোবাল্ট ও নিকেল যাদের পারমাণবিক ভর যথাক্রমে 58·94 এবং 58·69, পর্য্যায়সারণীতে যেহেতু মৌলগুলিকে এদের পারমাণবিক ভরের বর্দ্ধনশীল মান অনুযায়ী সাজান হয়, সুতরাং মনে হয় যে কোবাল্টের স্থান হবে নিকেলের পরে। কিন্তু কোবাল্ট ও নিকেলের পরস্পরের K_a রেখাদ্বয়ের স্পন্দনাঙ্ক মেপে দেখা যায় যে মোজলির সূত্র অনুসারে নিকেলের পারমাণবিক সংখ্যা কোবাল্টের চেয়ে এক বেশী অর্থাৎ নিকেলের স্থান হবে কোবাল্টের পরে। মোজলির সূত্রের সাহায্যে প্রাপ্ত এই তথ্য নিকেল ও কোবাল্টের রাসায়নিক প্রকৃতির সঙ্গেও সামঞ্জস্যপূর্ণ। বাস্তবিকপক্ষে মেণ্ডেলিয়েফ তাঁর পর্য্যায়সারণীতে নিকেলকে কোবাল্টের পরেই স্থাপিত করেছিলেন শুধুমাত্র এদের উভয়ের রাসায়নিক ধর্ম্মাবলী বিবেচনা ক'রে। মোজলির আবিষ্কার থেকে প্রমাণিত হয় যে রঞ্জনরশ্মির বর্ণালী স্বাভাবিক বর্ণালীর তুলনায় অনেক সরল। সাধারণ বর্ণালীর ক্ষেত্রে দুটি পাশাপাশি অবস্থিত (মেণ্ডেলিয়েফের সারণীতে) মৌলের বর্ণালীর ভিতর বিশেষ কোন সাদৃশ্য

নেই, সেখানে বর্ণালীর প্রকৃতি চক্রাকারে পরিবর্তিত হয়। যেমন সোডিয়াম বর্ণালী পটাশিয়াম, সিজিয়াম ইত্যাদি মৌলের বর্ণালীর সঙ্গে সাদৃশ্যপূর্ণ। কিন্তু পাশাপাশি অবস্থিত অর্থাৎ যেখানে পারমাণবিক সংখ্যার পার্থক্য এক, যেমন সোডিয়াম ও ম্যাগনেশিয়াম, কিংবা আর্গন ও সোডিয়ামের বর্ণালীর ভিতর সেরকম কোন নিকট সাদৃশ্য নেই। সাধারণ বর্ণালীর ক্ষেত্রে এই বৈসাদৃশ্যের কারণ পূর্বে বলা হয়েছে। রঞ্জনরশ্মির ক্ষেত্রে, এর উৎপত্তি ঘটে পরমাণুর

চিত্র 6·6

অন্তর্নিহিত পরিপূর্ণ সেলগুলি থেকে যেগুলি সাধারণ বর্ণালী সৃষ্টিতে কোনই অংশগ্রহণ করে না। প্রত্যেক মৌলের ক্ষেত্রেই অন্তর্নিহিত পরিপূর্ণ সেলগুলির ইলেকট্রন সজ্জার প্রকৃতি পরস্পর অভিন্ন এবং K_α রেখাগুলি সৃষ্টি হয় K সেল থেকে একটি ইলেকট্রন উৎখাত হলে, অর্থাৎ রঞ্জনরশ্মির বর্ণালী সৃষ্টির পদ্ধতি সমস্ত পরমাণুর ক্ষেত্রেই এক। সুতরাং যাবতীয় মৌলগুলির বর্ণালীর ভিতর যে সহজ পারস্পরিক সাদৃশ্য থাকবে তা আশা করা যায়।

মোজলির সূত্র হাইড্রোজেন বর্ণালীর বোর তত্ত্বের প্রায় সমসাময়িক এবং ঐ তত্ত্বের প্রয়োগের দ্বারা এই সূত্রের একটি সরল ব্যাখ্যা দেওয়া সম্ভব, একথা পূর্বেই বলা হয়েছে। পরিপূর্ণ K-সেলে দুটি ইলেকট্রন থাকে এবং এরা কেন্দ্রীনের আধানকে কিয়ৎপরিমাণে ঢেকে রাখে, এজন্য পরবর্তী L-সেলের ইলেকট্রনগুলি কেন্দ্রীনের যে আধানের সম্মুখীন হয় তার পরিমাণ $Z-2$। এখানে Z, কেন্দ্রীনের মোট আধান (প্রোটন আধানের এককে) যা পারমাণবিক সংখ্যার সমান। এখন মনে করা যাক K-সেল থেকে একটি ইলেকট্রনকে উৎখাত করা হয়েছে, যদি একটি K-ইলেকট্রন চলে যায় তবে L-সেলের ইলেকট্রনগুলি কেন্দ্রীনের যে আধান অনুভব করবে তার পরিমাণ $Z-1$। এই অবস্থায় যদি L-সেল থেকে K-সেলে একটি ইলেকট্রনের পরাবর্তন ঘটে তবে এর ফলে যে বিকিরণের সৃষ্টি হবে তার স্পন্দনাঙ্ক ঠিক বোর তত্ত্বের অনুরূপ গণনার দ্বারা নির্ধারণ করা যেতে পারে। বোর তত্ত্ব অনুসারে $Z-1$ কেন্দ্রীনের আধান-

বিশিষ্ট একটি পরমাণুতে L-সেল থেকে K-সেলে ইলেকট্রনের পরাবর্তনের ফলে যে বিকিরণের সৃষ্টি হয় তার স্পন্দনাঙ্ক হ'ল (4·21 সূত্র)

$$\nu = Rc\,(Z-1)^2\left[\frac{1}{1^2}-\frac{1}{2^2}\right]$$

$$\sqrt{\nu} = \sqrt{\frac{3}{4}Rc}\,(Z-1) \qquad 6·6$$

এখানে R, রিডবার্গ ধ্রুবক। এই সম্বন্ধটি ঠিক 6·5 সূত্রের অনুরূপ, এক্ষেত্রে $a=\sqrt{\frac{3}{4}Rc}$ এবং $b=1$। বিভিন্ন মৌলের K_α রেখাগুলি পরীক্ষা ক'রে মোজলি a, b ধ্রুবকদ্বয়ের যে পরিমাণ নির্ণয় করেন তার সঙ্গে 6·6 সূত্রের মোটামুটি সামঞ্জস্য আছে। একইভাবে, K_β, L_α ইত্যাদি রেখাগুলির জন্যও ঠিক 6·5 সূত্রের অনুরূপ সূত্র লেখা যায় এবং এদের ক্ষেত্রেও a, b ধ্রুবকদ্বয় বোর তত্ত্বের সাহায্যে গণনা করা সম্ভব। অবশ্য আরও নির্ভুলতর বিবরণ দিতে হলে 6·4 চিত্র অনুযায়ী একটি সেলের ভিতর বিভিন্ন l, j কোয়াণ্টাম সংখ্যাবিশিষ্ট শক্তিস্তরগুলির মধ্যে যে শক্তির বিভাজন আছে তাও বিবেচনা করতে হবে। সমারফেল্ড্ ইলেকট্রনের অন্তর্গমন এবং আপেক্ষিকতাভিত্তিক গতিবেগের সাথে সাথে স্তরের পরিবর্তনের তত্ত্ব প্রয়োগ ক'রে রঞ্জনরশ্মি শক্তিস্তরগুলির এইসকল বিভাজন ব্যাখ্যা করার চেষ্টা করেছেন। তবে এখানে স্মরণ রাখা কর্তব্য যে বোর-সমারফেল্ড্ তত্ত্বের বিবরণ রঞ্জনরশ্মি শক্তিস্তরের সমস্ত জটিলতাগুলি ব্যাখ্যা করতে পারে না। নির্ভুল ফলাফল পূর্ববর্তী পরিচ্ছেদে আলোচিত কোয়াণ্টাম তত্ত্বভিত্তিক গঠনকল্পের মাধ্যমেই একমাত্র পাওয়া সম্ভব।

রঞ্জনরশ্মি বিকিরণ পদ্ধতির সঙ্গে হাইড্রোজেন বর্ণালীর বিকিরণ পদ্ধতির যথেষ্ট সাদৃশ্য বর্তমান, এজন্য একই ধরণের সূত্রের দ্বারা উভয় বর্ণালীর বিবরণ দেওয়া সম্ভব হবে, এটা খুব আশ্চর্য্য নয়। তবে রঞ্জনরশ্মি বিকিরিত হয় পরমাণুর অন্তর্নিহিত সেলগুলি থেকে, এজন্য কেন্দ্রীনের যে আধান এই প্রক্রিয়ায় অংশগ্রহণ করে তার পরিমাণ অনেক বেশী হয় এবং বিকিরিত স্পন্দনাঙ্ক হয় কেন্দ্রীনের আধানের বর্গের সমানুপাতী। হাইড্রোজেন পরমাণুতে L স্তর থেকে K স্তরে পরাবর্তন হলে লাইম্যান শ্রেণীর প্রথম রেখাটি উৎপন্ন হয়, 6·6 সূত্রে Z=2 বসালে এই রেখাটির স্পন্দনাঙ্ক গণনা করা যায়। এর সঙ্গে তুলনা করা যেতে পারে মলিবডেনামের K_α রেখার, এখানে Z=42। সুতরাং মলিবডেনামের K_α রেখার স্পন্দনাঙ্ক হাইড্রোজেনের ঐ রেখাটির স্পন্দনাঙ্কের চেয়ে 1681 গুণ বেশী হবে। 8·5 সারণীর সঙ্গে তুলনা

করলে এবার দেখা যাবে যে হাইড্রোজেনের লাইম্যান শ্রেণীর রেখাটি যদি বেগুনীপারের অঞ্চলে থাকে তবে মলিবডেনামের K_α রেখাটি রঞ্জনরশ্মি অঞ্চলে থাকবে।

রঞ্জনরশ্মির শোষণ

রঞ্জনরশ্মি তীব্র অন্তর্গমনক্ষম একথা পূর্ব্বেই বলা হয়েছে। অপেক্ষাকৃত সহজ পরীক্ষার আয়োজনের দ্বারাই পদার্থের ভিতর রঞ্জনরশ্মির শোষণের প্রকৃতি সম্বন্ধে অবহিত হওয়া যায়।

একটি অধ্যায়ে (নবম অধ্যায়) গামারশ্মির শোষণের প্রকৃতি নির্ণয়ের জন্য একটি পরীক্ষার আয়োজনের বিষয় বিশদভাবে আলোচনা করা হবে, সেখানে 9·11(a) চিত্রে গামারশ্মির শোষণ পরিমাপনের যে আয়োজনের ছবি দেওয়া হয়েছে ঠিক সেইরকম আয়োজন রঞ্জনরশ্মির ক্ষেত্রেও প্রযুক্ত হয়ে থাকে। পরীক্ষাগারে যে রঞ্জনরশ্মি উৎপন্ন হয় তার ভিতর বহুসংখ্যক বিভিন্ন স্পন্দনাঙ্কের রশ্মি মিশে থাকে, শোষণের পরীক্ষার জন্য এই রশ্মিকে অনন্য স্পন্দনাঙ্ক সমন্বিত করা প্রয়োজন হয়। ব্র্যাগ স্ফটিক বর্ণালী বিশ্লেষক ব্যবহার করলে তাতে একটি বিশেষ কোণে নির্গত ব্যতিচারী রশ্মি অনন্য তরঙ্গদৈর্ঘ্য সমন্বিত হবে, কিন্তু এর ফলে রঞ্জনরশ্মির তীব্রতা অতিমাত্রায় হ্রাস পায় এবং তখন শোষণের পরীক্ষা করা বেশ কঠিন হয়ে পড়ে। অপর একটি সহজ উপায় হ'ল উৎপন্ন রঞ্জনরশ্মিকে কোন একটি শোষকের পাত, যেমন তামার পাতের ভিতর দিয়ে চালিত করা, ঐ পাতের ভিতর দীর্ঘতর তরঙ্গদৈর্ঘ্য-সমন্বিত রশ্মিগুলি শোষিত হয়ে যায় এবং এর ফলে নির্গত রশ্মির মধ্যে তরঙ্গদৈর্ঘ্যের বিস্তরণ অনেকটা সঙ্কুচিত হয়ে পড়ে। অবশ্য এইভাবে কখনই পুরোপুরি অনন্য তরঙ্গদৈর্ঘ্য-বিশিষ্ট রশ্মি উৎপন্ন করা সম্ভব হয় না, তবে দ্রুত পরিমাপনের জন্য এটি একটি সহজসাধ্য পদ্ধতি। নবম অধ্যায়ে এই পরীক্ষার বিস্তৃত বিবরণ দেওয়া হয়েছে এজন্য এখানে আমরা এই বিষয়ে আর বিশেষ আলোচনা করব না। গামারশ্মি ও রঞ্জনরশ্মি শোষণের প্রকৃতি নিম্নলিখিত সূত্রের দ্বারা প্রকাশ করা যায়

$$I = I_0 e^{-\mu x} \qquad 6·7$$

এখানে I_0 হল শোষকের পাতটির উপর আপতিত হওয়ার পূর্ব্বে (অর্থাৎ শোষণের পূর্ব্ববর্তী) রঞ্জনরশ্মির তীব্রতা এবং I, শোষকের ভিতর লম্বভাবে x দূরত্ব অতিক্রম করার পর অবশিষ্ট তীব্রতার পরিমাণ। μ একটি ধ্রুবক, এটি নির্ভর করে শোষকের প্রকৃতির উপর, এছাড়া রঞ্জনরশ্মির তরঙ্গদৈর্ঘ্যের উপরও এটি নির্ভরশীল, একে বলা হয় রঞ্জনরশ্মির শোষণের সহগ।

6·7 সূত্রটি নিম্নলিখিত সহজ বিশ্লেষণের দ্বারা স্থাপিত করা যায়। ধরা যাক শোষকের ভিতর স্বল্প পুরুত্ব Δx অতিক্রম করতে রঞ্জনরশ্মির তীব্রতার ΔI পরিমাণ হানি ঘটে। পরীক্ষায় সহজেই দেখা যায় যে এই ΔI, পুরুত্ব Δx এবং প্রাথমিক তীব্রতা I-এর সমানুপাতী, অর্থাৎ

$$\Delta I = -\mu I \Delta x$$

এখানে μকে ধরা হয়েছে সমানুপাতের ধ্রুবক হিসাবে, μ x নিরপেক্ষ। এখানে ঋণ চিহ্নের সাহায্যে বোঝান হয়েছে যে শোষণের ফলে তীব্রতা ক্রমশঃ হ্রাস পেতে থাকে। যখন Δx, ΔI অসীম ক্ষুদ্র পরিমাণের সীমায় তখন সমাকলনের সুবিধার জন্য এই সর্তটিকে আমরা নিম্নলিখিত উপায়ে লিখতে পারি

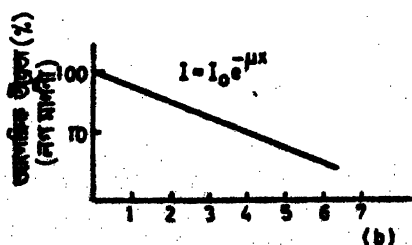
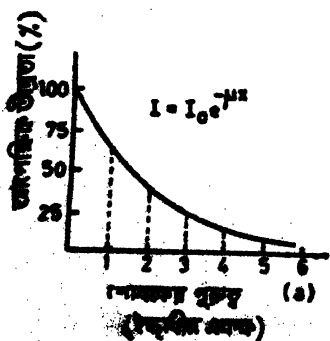
$$\frac{dI}{I} = -\mu dx$$

এবার সমাকলন করলে আমরা পাই

$$\log I = \log I_0 - \mu x$$

$$I/I_0 = e^{-\mu x} \qquad \cdots \qquad 6{\cdot}8$$

এখানে $log\ I_0$ ধ্রুবক, স্পষ্টতঃই I_0 হ'ল সমাকলনের রঞ্জনরশ্মির তীব্রতা যখন $x = 0$ অর্থাৎ শোষণ শুরু হবার পূর্বে তীব্রতার পরিমাণ।

6·7 ও 6·8 সূত্রদ্বয়ের লেখ যথাক্রমে 6·7(a) ও 6·7(b) চিত্রে দেখান হয়েছে। লেখদ্বয়ের মধ্যে x এবং y উভয় স্থানাঙ্কের জন্যই সম্পূর্ণ ইচ্ছাধীন মাপনী ব্যবহার করা হয়েছে এবং μএর পরিমাণও ইচ্ছাধীন (arbitrary)। শোষণের পরীক্ষায় ঠিক এই ধরণের লেখগুলিই আবির্ভূত হয়। 6·7(b) লেখটির আপতন (slope) থেকে শোষণের সহগ μএর মান নির্দ্ধারিত হয়।

চিত্র 6·7 (a) 6·8 সমীকরণের লেখ।
(b) y-অক্ষ বরাবর লগ-মাপনী ব্যবহার করলে এই লেখটি একটি সরলরেখায় পরিণত হয়।

উদাহরণ। এক এমইভি শক্তির গামারশ্মির তীব্রতা কমিয়ে প্রাথমিক পরিমাণের শতকরা মাত্র 10 ভাগে পরিণত করতে কত পুরু সীসার পাতের প্রয়োজন হবে ?

6.8 সূত্রটি প্রয়োগ করলে আমরা লিখতে পারি

$$log_e I - log_e I_0 = -\mu x$$

ন্যাপিরিয়ান লগারিদমের পরিবর্তে সাধারণ লগারিদম (ভূমি 10) ব্যবহার করলে সূত্রটি দাঁড়ায়

$$2{\cdot}303 \times (log_{10} I - log_{10} I_0) = -\mu x$$
$$log_{10}(I/I_0) = -0{\cdot}434\mu x$$

সীসার ভিতর 1 এমইভি রঞ্জনরশ্মির শোষণের সহগ পরীক্ষার দ্বারা মাপা হয়েছে, এর পরিমাণ 0·790 সেমি$^{-1}$। বর্তমান ক্ষেত্রে $I/I_0 = \frac{1}{10}$, সুতরাং

$$log_{10}(\tfrac{1}{10}) = -0{\cdot}434 \times 0{\cdot}790x$$
$$\therefore \quad x = \frac{1}{0{\cdot}434 \times 0{\cdot}79} = 2{\cdot}92 \text{ সেমি}$$

এই উদাহরণ থেকে দেখা যায় যে 3 সেমি সীসার পুরুত্ব আপতিত তীব্রতাকে দশগুণ কমিয়ে ফেলে, এর পর আরও 3 সেমি পুরু সীসার পাত যোগ করলে তীব্রতা আরও দশগুণ হ্রাস পাবে অর্থাৎ 6 সেমি সীসার পুরুত্ব আপতিত তীব্রতাকে একশ' ভাগের একভাগে পরিণত করে। যে পরিমাণ শোষকের পুরুত্ব প্রাথমিক তীব্রতাকে অর্দ্ধেকে পরিণত করে তাকে বলা হয় "অর্দ্ধ পুরুত্ব" ($x_{\frac{1}{2}}$), বিভিন্ন অর্দ্ধ পুরুত্বের জ্ঞান থেকে বিভিন্ন শোষকের শোষণ ক্ষমতার সহজ তুলনা করা সম্ভব। তাছাড়া একটি বিশেষ শোষকের ভিতর বিভিন্ন তরঙ্গদৈর্ঘ্যের রঞ্জনরশ্মির অর্দ্ধ পুরুত্বের পরিমাণ নির্ণয় ক'রে ঐসব রশ্মিগুলির শক্তি সম্বন্ধে তুলনামূলক জ্ঞান অর্জ্জন করা যায়। 6·7 সূত্র থেকে দেখা যায় যে যদি শোষকের পুরুত্ব বাড়িয়ে যাওয়া যায় তবে অবশ্যই তীব্রতা দ্রুত হ্রাস পেতে থাকবে, বাস্তবক্ষেত্রে সাধারণতঃ কোন নির্দিষ্ট পরিমাণ পুরুত্ব অতিক্রম করার পর তীব্রতা এত হ্রাস পায় যে তা আর পরিমাপ করার কোন উপায় থাকে না।

6·7 সূত্রটিকে নিম্নলিখিত ভিন্ন উপায়ে লেখা সম্ভব

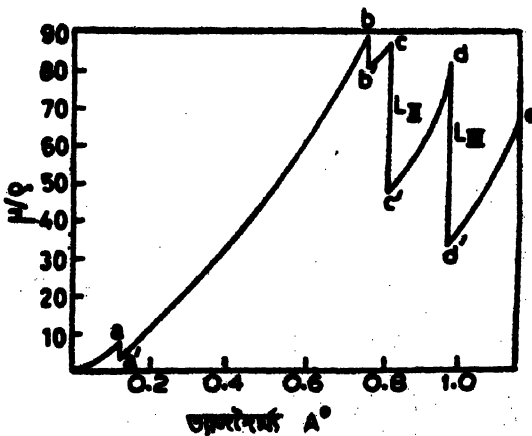
$$I = I_0 e^{-\mu x} = I_0 e^{-(\mu/\rho)\rho x} \qquad 6{\cdot}9$$

সমীকরণটিকে এভাবে লিখলে আমরা পাই সরল শোষণ সহগ μএর পরিবর্তে ভর শোষণ সহগ μ/ρ, এখানে ρ শোষকের ঘনত্ব। ρx রাশিটি নির্দেশ করে প্রতি বর্গসেন্টিমিটার পিছু শোষকের ভর, একে বলা হয় বর্গায়তন ঘনত্ব (mass per unit area) এবং প্রকাশ করা হয় গ্রাম/সেমি^{2} এককে। μ/ρ প্রকাশ করা হয় সেমি^{2}/গ্রাম এককে। ভর শোষণ সহগের বৈশিষ্ট্য হ'ল এই যে, এটি সাধারণতঃ পদার্থের রাসায়নিক এবং ভৌত ধর্মাবলী নিরপেক্ষ। উদাহরণস্বরূপ, যেখানে রঞ্জনরশ্মির সরল শোষণ সহগ জলবাষ্পের তুলনায় জলের ক্ষেত্রে অনেক বেশী, উভয় ক্ষেত্রেই কিন্তু ভর শোষণ সহগের পরিমাণ সমান। এজন্য অনেক ক্ষেত্রেই অর্দ্ধ পুরুত্বের মান "সেমি" এককের বদলে গ্রাম/সেমি^{2} এককের দ্বারা প্রকাশ করা হয়ে থাকে।

শোষণের পরীক্ষা থেকে যে শুধু রঞ্জনরশ্মির শক্তি অথবা শোষকের শোষণ ক্ষমতা সম্বন্ধেই জ্ঞান লাভ করা যেতে পারে তা নয়, অনেক ক্ষেত্রেই এই ধরণের পরীক্ষায় শোষকের পরমাণুর শক্তিস্তরগুলি সম্বন্ধেও অত্যন্ত প্রয়োজনীয় জ্ঞান অর্জন করা যায়। সীসার ভিতর রঞ্জনরশ্মির শোষণের বিস্তৃত বিবরণ দিয়ে আমরা এই শেষোক্ত মন্তব্যটি বিশ্লেষণ করব। 6·8 চিত্রে $0{\cdot}1A^\circ < \lambda < 1{\cdot}2A^\circ$ তরঙ্গদৈর্ঘ্য অঞ্চলে তরঙ্গদৈর্ঘ্যের অপেক্ষক হিসাবে পরীক্ষায় নির্ণীত সীসার ভর শোষণ সহগের একটি লেখ দেখান হয়েছে। প্রাথমিক শূন্য মান থেকে শুরু করে μ/ρএর পরিমাণ তরঙ্গদৈর্ঘ্যের সাথে দ্রুত বৃদ্ধি পেতে থাকে যতক্ষণ পর্য্যন্ত না a বিন্দুতে পৌঁছান যায়। a বিন্দুতে $\lambda = 0{\cdot}14A^\circ$ এবং $\mu/\rho = 8$ (প্রায়)। a বিন্দুর পরেই কিন্তু ভর শোষণ সহগের পরিমাণ হঠাৎ a' বিন্দুতে নেমে আসে যেমন চিত্রে দেখা যাচ্ছে, a বিন্দুতে বলা হয় K-শোষণের সীমা (K-absorption edge), a বিন্দু পর্য্যন্ত শোষণের ভিতর আলোক বিদ্যুৎ প্রক্রিয়ার দ্বারা সীসার K-ইলেকট্রন উৎখাত হতে থাকে। কিন্তু পরবর্তী বৃহত্তর তরঙ্গদৈর্ঘ্যে দিয়ে আলোককণার শক্তি এত হ্রাস পায় যে K-শোষণ প্রক্রিয়া আর ঘটতে পারে না এবং এই কারণেই শোষণের পরিমাণ সহসা হ্রাস পায়।

তরঙ্গদৈর্ঘ্য আরও বৃদ্ধি পেতে থাকলে অবশ্য শোষণ আবার বৃদ্ধি পেতে থাকে, তখন শোষণ ঘটতে থাকে মুখ্যতঃ L খোলের ভিতর আয়নীভবন ঘটার দরুণ যে পর্য্যন্ত না b বিন্দুতে এসে পৌঁছান যায় যেখানে $\lambda = 0{\cdot}78A^\circ$ এবং $\mu/\rho = 176$। এর পরবর্তী বৃহত্তর তরঙ্গদৈর্ঘ্যে আলোককণার শক্তি এত হ্রাস পায় যে তখন আর L খোলে আলোক-বিদ্যুৎ প্রক্রিয়া ঘটতে পারে না এবং শোষণের পরিমাণ আবার হঠাৎ হ্রাস পেয়ে b' বিন্দুতে নেমে আসে,

b' বিন্দু থেকে c বিন্দু পর্য্যন্তও L সেলে কিছু শোষণ ঘটতে থাকে কারণ তখন L_{II} এবং L_{III} উপসেল থেকে আয়নীভবন ঘটতে থাকে, যদিও L_I সেলে আয়নীভবন সম্পূর্ণ বন্ধ হয়ে যায়। একই ধরণের পতন (অর্থাৎ হঠাৎ পরিবর্ত্তন) ঘটে $cc'(\lambda = 0{\cdot}81A^\circ)$ এবং $dd'(\lambda = 0{\cdot}95A^\circ)$ বিন্দুগুলিতে, ঐসব অবস্থায় যথাক্রমে L_{II} এবং L_{III} শোষণের সীমায় এসে পৌঁছান যায়। d' বিন্দু অতিক্রম ক'রে গেলে সমগ্র L স্তরে শোষণ সম্পূর্ণ বন্ধ হয়ে যায়। d' বিন্দুটি ছাড়িয়ে গেলে অবশ্য আবার শোষণের পরিমাণ বৃদ্ধি পেতে থাকে, ঐ বিন্দুর পরবর্ত্তী আরও উচ্চতর তরঙ্গদৈর্ঘ্যে পরীক্ষা করলে দেখা যাবে যে $3{\cdot}2A^\circ < \lambda < 5{\cdot}0A^\circ$ অঞ্চলের মধ্যে বিভিন্ন "পতন" বা হঠাৎ পরিবর্ত্তন লক্ষিত হচ্ছে, এগুলি হ'ল যথাক্রমে পাঁচটি M শোষণের সীমা। প্রায় $14A^\circ$ তরঙ্গদৈর্ঘ্য থেকে শুরু করলে একইভাবে আরও সাতটি পতন বিন্দু পাওয়া যাবে যথাক্রমে সাতটি N স্তরের জন্য।

একই ধরণের শোষণের লেখ পরিলক্ষিত হয় অন্যান্য মৌলের ক্ষেত্রেও। যেহেতু অন্যান্য ক্ষেত্রে পারমাণবিক সংখ্যার মান সীসার তুলনায় কম এজন্য ঐসকল পতনবিন্দুগুলি লক্ষ্য করা যাবে ক্রমিকভাবে আরও উচ্চতর তরঙ্গদৈর্ঘ্যে। পারমাণবিক সংখ্যা যত কম হবে ততই ঐসব বিশেষ বিশেষ তরঙ্গদৈর্ঘ্যগুলির মান আরও বৃদ্ধি পাবে। সুতরাং এই ধরণের শোষণের পরীক্ষা পরমাণুগুলির অন্তর্নিহিত শক্তিস্তরগুলি সম্বন্ধে জানার একটি প্রকৃষ্ট উপায়, এই পদ্ধতিতে প্রতিটি সেলের ভিতর ইলেকট্রনগুলির বন্ধনশক্তিও অপেক্ষাকৃত সহজে নির্দ্ধারিত হয়।

চিত্র 6·4 : সীসার পরমাণুর রঞ্জনরশ্মি শোষণের সীমাসমূহ
(স্কেল : y অক্ষের এক একক = μ/ρ এর দুই একক)

পদার্থের ভিতর রঞ্জনরশ্মি প্রধানতঃ তিনটি বিভিন্ন প্রক্রিয়ার সৃষ্টি করে, এগুলি হ'ল যথাক্রমে আলোক-বিদ্যুৎ প্রক্রিয়া, কম্পটন প্রক্রিয়া এবং জোড়া সৃষ্টি প্রক্রিয়া (pair creation process)। রঞ্জনরশ্মির শোষণের মূলে এই তিনটি প্রক্রিয়াই কার্য্যকরী, এদের জন্য পৃথক পৃথক তিনটি শোষণের সহগ নির্দেশ করা যায় এবং ঐগুলি তাত্ত্বিক উপায়ে মোটামুটি নির্ভুলভাবে গণনা করা সম্ভব। ঐ তিনটি প্রক্রিয়ার জন্য যদি শোষণের সহগ হয় যথাক্রমে μ_1, μ_2 এবং μ_3, তবে মোট শোষণের সহগ হবে এদের সম্মিলিত ফল, $\mu=\mu_1+\mu_2+\mu_3$।

অপেক্ষাকৃত বৃহত্তর তরঙ্গদৈর্ঘ্যের রঞ্জনরশ্মির ক্ষেত্রে আরও একটি প্রক্রিয়া বিশেষ কার্য্যকরী, একে বলা হয় টমসন (Thompson) বিচ্ছুরণ। এই বিচ্ছুরণে রঞ্জনরশ্মি কোন একটি পরমাণুর উপর আপতিত হলে ইলেকট্রনগুলি এর প্রভাবে স্পন্দিত হয়ে উঠে চতুর্দিকে পুনরায় একই তরঙ্গদৈর্ঘ্যের রশ্মি বিকিরণ করতে থাকে। এক্ষেত্রে আপতিত রশ্মি ও বিচ্ছুরিত রশ্মির মধ্যে নির্দ্দিষ্ট দশার সম্পর্ক থাকে। রঞ্জনরশ্মিতে যে স্ফটিক ব্যাতিচার ক্রিয়া লক্ষিত হয় তা এই টমসন বিচ্ছুরণের ফলেই সম্ভব হয়। রঞ্জনরশ্মি পদার্থের ভিতর দিয়ে যাবার সময় উপরোক্ত সমস্ত প্রক্রিয়াগুলিই সৃষ্টি করতে পারে তবে আলোককণার শক্তিভেদে বিভিন্ন প্রক্রিয়া ঘটার সম্ভাব্যতার হ্রাসবৃদ্ধি ঘটে। যেমন, কম শক্তিবিশিষ্ট আলোককণার ক্ষেত্রে টমসন বিচ্ছুরণ ও আলোক-বিদ্যুৎ প্রক্রিয়া ঘটার সম্ভাবনা বেশী। অধিকতর শক্তিতে কম্পটন প্রক্রিয়া ঘটে এবং যখন $h\nu >> 2m_e c^2$ তখন জোড়া সৃষ্টি প্রক্রিয়া ঘটার সম্ভাবনা খুব বেশী হয়।

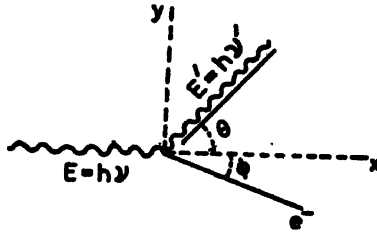
কোন কোন প্রদীপনশীল পদার্থ রঞ্জনরশ্মির প্রভাবে প্রদীপ্ত হয়ে ওঠে অর্থাৎ রঞ্জনরশ্মি আপতিত হলে এরা দৃশ্য আলো বিকিরণ করতে থাকে, বিজ্ঞানী রঞ্জেন তাঁর প্রথম পরীক্ষায় বেরিয়াম প্লাটিনোসায়ানাইড মাখান কাগজের ভিতর এই প্রদীপন লক্ষ্য করেছিলেন। তাছাড়া রঞ্জনরশ্মির প্রভাবে ফোটোগ্রাফীর প্লেটও কালো হয়ে যায়, এইজন্য এই রশ্মিতে ছবি তোলা সম্ভব। বায়ু বা অন্য কোন পদার্থের ভিতর রঞ্জনরশ্মি আলোক-বিদ্যুৎ প্রক্রিয়া বা কম্পটন প্রক্রিয়ার দ্বারা আয়নীভবনের সৃষ্টি করে, এই আয়নীভবন লক্ষ্য ক'রেও রঞ্জনরশ্মির অস্তিত্ব নিরূপণ করা যায়।

কম্পটন (Compton) প্রক্রিয়া

কোয়ান্টাম তত্ত্বে আলোককণার যে নির্দ্দিষ্ট পরিমাণ ভরবেগ থাকে সে বিষয়ে তৃতীয় অধ্যায়ে আলোচনা করা হয়েছে, কম্পটন প্রক্রিয়ায় ইলেকট্রনের

সঙ্গে আলোককণার সংঘর্ষ ঘটে এবং এই প্রক্রিয়া থেকে আলোককণার মধ্যে তরঙ্গের অস্তিত্ব সম্বন্ধে সরাসরিভাবে অবহিত হওয়া যায়। কম্পটন প্রক্রিয়া যেভাবে ঘটে তা 6·9 চিত্রে বর্ণনা করা হয়েছে। এখানে তরঙ্গিত রেখাগুলি আপতিত ও সংঘর্ষোত্তর আলোককণাদ্বয়কে নির্দেশ করে, তীরচিহ্নিত রেখার দ্বারা সংঘর্ষোত্তর ইলেকট্রনকে নির্দেশ করা হয়েছে। সংঘর্ষের পূর্ব্বে ইলেকট্রনটি স্থির ছিল এমন ধরে নেওয়া হয়।

সনাতন পদার্থবিজ্ঞান অনুযায়ী রঞ্জনরশ্মির শুধু টমসন বিচ্ছুরণ সম্ভব অর্থাৎ আপতিত রঞ্জনরশ্মি তরঙ্গের প্রভাবে পরমাণুর অভ্যন্তরস্থ ইলেকট্রনগুলি স্পন্দিত হতে থাকে এবং এই স্পন্দনের স্পন্দনাঙ্ক হয় আপতিত রশ্মির স্পন্দনাঙ্কের সমান। স্পন্দনশীল ইলেকট্রন পুনরায় যে রঞ্জনরশ্মি চতুর্দ্দিকে বিচ্ছুরণ করে তার স্পন্দনাঙ্কও সব সময়ই আপতিত স্পন্দনাঙ্কের সঙ্গে অভিন্ন থাকবে। কিন্তু কম্পটন প্রক্রিয়ায় বিচ্ছুরিত রশ্মির স্পন্দনাঙ্কের পরিমাণ হ্রাস পায়, এজন্য সনাতন পদার্থবিজ্ঞান অনুসারে এই প্রক্রিয়ার কোন ব্যাখ্যা পাওয়া সম্ভব হয় না। বিজ্ঞানী কম্পটন প্ল্যাঙ্ক ও আইনস্টাইনের

চিত্র 6·9

আলোককণা প্রকল্প ব্যবহার ক'রে এই ঘটনাটির একটি যুক্তিসঙ্গত ও সহজবোধ্য ব্যাখ্যা দিতে সক্ষম হলেন। কম্পটনের ধারণা অত্যন্ত সরল, তাঁর মতে এক্ষেত্রে সত্যি সত্যি যা ঘটছে তা হ'ল একটি আলোককণা ও একটি ইলেকট্রনের মধ্যে সরাসরি সংঘর্ষ, ঠিক যেভাবে দুটি পদার্থপিণ্ডের মধ্যে সংঘর্ষ ঘটে থাকে। এই সংঘর্ষে শক্তি ও ভরবেগ সংরক্ষণ প্রকাশ করার জন্য কম্পটন আপেক্ষিকতাতত্ত্বের বলবিজ্ঞানের সাহায্য নেন। আপেক্ষিকতার সূত্রের মাধ্যমে শক্তিসংরক্ষণের নীতিটি এক্ষেত্রে নিম্নলিখিত উপায়ে লেখা যায়

$$h\nu - h\nu' = \frac{hc}{\lambda} - \frac{hc}{\lambda'} = mc^2 - m_0c^2 \qquad 6{\cdot}10$$

আলোককণার ভরবেগ $\frac{h}{\lambda}$ এবং ইলেকট্রনের ভরবেগ mv, সুতরাং ভরবেগের x-অভিক্ষেপ সংরক্ষণের নীতি নিম্নলিখিত উপায়ে লেখা যায়

$$\frac{h}{\lambda}=\frac{h}{\lambda'}\cos\theta+mv\cos\phi \qquad \cdots \qquad 6\cdot11$$

এবং y-অভিক্ষেপের সংরক্ষণের সূত্র হ'ল

$$0=\frac{h}{\lambda'}\sin\theta-mv\sin\phi \qquad 6\cdot12$$

এখানে m_0 হল ইলেকট্রনের স্থির ভর এবং m, v গতিতে গমনশীল ইলেকট্রনের ভর অর্থাৎ $mc^2-m_0c^2$ ইলেকট্রনের মোট সংঘর্ষোত্তর অর্জিত গতিশক্তি এবং

$$m=\frac{m_0}{\sqrt{1-v^2/c^2}}$$

এবং λ ও λ' যথাক্রমে আপতিত ও বিচ্ছুরিত রশ্মির তরঙ্গদৈর্ঘ্য। 6·11 ও 6·12 সম্বন্ধদ্বয়কে ভিন্নভাবে সাজিয়ে এবং উভয় দিকের বর্গ নিয়ে লিখলে আমরা পাই

$$(mv\cos\phi)^2=\left(\frac{h}{\lambda}-\frac{h}{\lambda'}\cos\theta\right)^2=\frac{h^2}{\lambda^2}+\frac{h^2}{\lambda'^2}\cos^2\theta$$
$$-2\frac{h}{\lambda}\cdot\frac{h}{\lambda'}\cos\theta$$

$$(mv\sin\phi)^2=\frac{h^2}{\lambda'^2}\sin^2\theta$$

এবং উভয় দিক থেকে যোগ করলে

$$(mv)^2=\frac{h^2}{\lambda^2}+\frac{h^2}{\lambda'^2}-\frac{2h}{\lambda}\cdot\frac{h}{\lambda'}\cos\theta \qquad 6\cdot13$$

একইভাবে 6·10 সম্বন্ধটিকে ভিন্নভাবে সাজিয়ে ও উভয়দিকে বর্গ নিলে নিম্নলিখিত সমীকরণ পাওয়া যায়

$$(mc)^2=\left(\frac{h}{\lambda}-\frac{h}{\lambda'}+m_0c\right)^2$$
$$=\frac{h^2}{\lambda^2}+\frac{h^2}{\lambda'^2}+m_0^2c^2-2\frac{h}{\lambda}\cdot\frac{h}{\lambda'}-\frac{2h}{\lambda'}\cdot m_0c$$
$$+\frac{2h}{\lambda}\cdot m_0c \qquad 6\cdot14$$

এখন 6·14 সমীকরণ থেকে 6·13 সমীকরণটি বিয়োগ করলে আমরা পাই

$$m^2(c^2-v^2)=m^2c^2\,(1-v^2/c^2)=m_0{}^2c^2$$

$$=-2\frac{h}{\lambda}\cdot\frac{h}{\lambda'}\,(1-\cos\theta)+m_0{}^2c^2+2\left(\frac{h}{\lambda}-\frac{h}{\lambda'}\right)m_0c$$

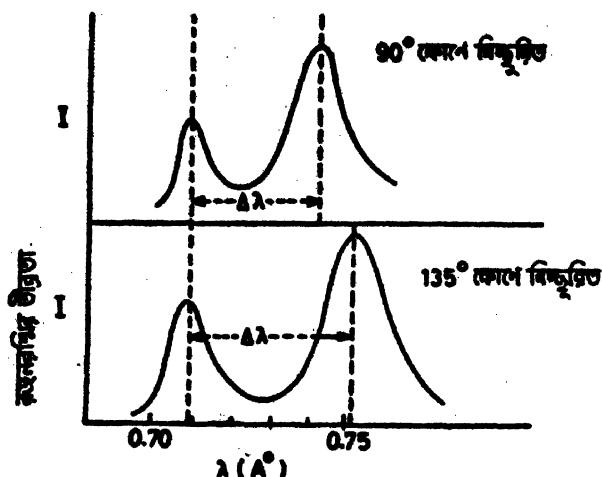
এই সমীকরণটি থেকে আমরা কম্পটন প্রক্রিয়ার নিম্নলিখিত বিখ্যাত সূত্রটি উদ্ধার করতে পারি

$$\lambda'-\lambda=\frac{h}{m_0c}\,(1-\cos\theta) \qquad 6·15$$

কম্পটন প্রক্রিয়ার পরীক্ষায় বিচ্ছুরিত আলোককণার তরঙ্গদৈর্ঘ্য λ' বিচ্ছুরণ কোণ θ-র অপেক্ষক হিসাবে মাপা হয়। তরঙ্গদৈর্ঘ্যগুলি মাপা হয় স্ফটিক ব্যতিচারের সাহায্য নিয়ে, ব্র্যাগ বর্ণালী মাপনী ব্যবহার ক'রে। বিভিন্ন কোণ θ এবং সেইসব কোণে কম্পটন প্রক্রিয়ায় বিচ্ছুরিত রশ্মির তরঙ্গদৈর্ঘ্য মাপলে দেখা যায় যে উপরোক্ত 6·15 সমীকরণ অত্যন্ত নির্ভুলভাবে পালিত হয়। এথেকে এই সম্বন্ধটিতে পৌঁছাতে কম্পটন যে প্রকল্পসমূহ ব্যবহার করেছেন সেগুলি সমর্থিত হয়। ঐ সূত্রটি পেতে গিয়ে আমরা ধরে নিয়েছি যে, সংঘর্ষের পূর্বে ইলেকট্রনটি মুক্ত ও স্থির থাকে সুতরাং এর বন্ধনশক্তির পরিমাণ শূন্য। বাস্তবে সাধারণতঃ পরমাণুর সবচেয়ে বহিঃস্থ ইলেকট্রনগুলিই শুধু কম্পটন প্রক্রিয়ায় অংশগ্রহণ করে, এদের বন্ধনশক্তির পরিমাণ আপতিত রঞ্জনরশ্মি আলোককণার শক্তির তুলনায় নগণ্য থাকে, এজন্য উপরোক্ত প্রকল্প অস্বাভাবিক নয় এবং এর ফলে বিশেষ কোন ভুল হবার সম্ভাবনা নেই। কম্পটন প্রক্রিয়ার উপরিলিখিত বিশ্লেষণ আলোর কোয়াণ্টাম প্রকৃতিকে আরও দৃঢ়ভাবে স্থাপিত করে। প্ল্যাঙ্ক ও আইনস্টাইনের আলোককণাতত্ত্ব শুধু যখন আলোকশক্তি শোষিত ও বিকিরিত হচ্ছে তখন এর কোয়াণ্টাম প্রকৃতি দাবী করে, কিন্তু প্রবহমান আলোককণার স্বরূপ সম্বন্ধে এই তত্ত্বগুলি বিশেষ আলোকপাত করে না। কম্পটন প্রক্রিয়া থেকে স্পষ্টই দেখা যায় যে আলোকশক্তি যখন প্রবহমান তখনও এর কোয়াণ্টাম প্রকৃতি পূর্ণ মাত্রায় বজায় থাকে এবং পদার্থকণার সঙ্গে সংঘর্ষে এটি ঠিক একটি কণার মতই ব্যবহার করে। তাছাড়া যেহেতু কম্পটন প্রক্রিয়ার বিশ্লেষণে আপেক্ষিকতাতত্ত্বের সূত্রগুলি প্রয়োগ করা হয়, এই গণনার সাফল্য আপেক্ষিকতাতত্ত্বের সাফল্যও প্রতিপন্ন করে।

কম্পটন প্রক্রিয়ায় বিচ্ছুরিত রশ্মির তরঙ্গদৈর্ঘ্যের যে পরিবর্তন ঘটে তার পরিমাণ খুবই সামান্য, বিভিন্ন ধ্রুবকগুলির মান প্রয়োগ করলে আমরা পাই

$$\frac{h}{m_0c}=0·024\text{A}^\circ \qquad 6·16$$

অর্থাৎ 90° কোণে বিক্ষুরিত তরঙ্গদৈর্ঘ্যের যে পরিবর্তন লক্ষিত হবে তা হ'ল 0·024A°, এই রাশিটিকে বলা হয় কম্পটন তরঙ্গদৈর্ঘ্য। 180° কোণে সর্বাপেক্ষা অধিক পরিবর্তন লক্ষিত হবে। তরঙ্গদৈর্ঘ্যের এই পরিবর্তনের পরিমাণ $\Delta\lambda$, কোন পদার্থের ভিতর থেকে বিক্ষুরণ ঘটছে তার উপর নির্ভর করে না, কারণ 6·15 সূত্রে শুধু ইলেকট্রনের স্থির ভরের আবির্ভাব ঘটে। একটি পরীক্ষায় প্রাপ্ত বিক্ষুরণ কোণের সাথে সাথে তরঙ্গদৈর্ঘ্যের পরিবর্তনের প্রকৃতি 6·10 চিত্রে দেখান হয়েছে। তাছাড়া $\Delta\lambda$-র মান আপতিত রশ্মির

চিত্র 6·10 : কার্বন খাতবহের উপর কম্পটন প্রক্রিয়ার দ্বারা বিক্ষুরিত মলিবডেনাম K_α রেখার তরঙ্গদৈর্ঘ্যের পরিবর্তন।

তরঙ্গদৈর্ঘ্যের উপরও নির্ভর করে না। তবে যেকোন কোণেই পরিবর্তিত তরঙ্গদৈর্ঘ্যের সঙ্গে অপরিবর্তিত তরঙ্গদৈর্ঘ্যের রশ্মিও বর্তমান থাকে এবং কোয়ান্টাম তত্ত্বের সাহায্যে এই অপরিবর্তিত তরঙ্গদৈর্ঘ্যের বিক্ষুরিত রশ্মির অস্তিত্বও ব্যাখ্যা করা যায়। যদি একটি রঞ্জনরশ্মির আলোককণা এমন একটি ইলেকট্রনকে আঘাত করে যেটি পরমাণুর ভিতর অত্যন্ত দৃঢ়ভাবে বদ্ধ এবং আলোককণাটি একে উৎখাত করতে বা এর ভিতর ভরবেগ সঞ্চারিত করতে সক্ষম হয় না, সেক্ষেত্রে এই সংঘর্ষের ফলে সমগ্র পরমাণুটির ভিতর ভরবেগ সঞ্চারিত হয়। অর্থাৎ তখন প্রক্রিয়াটি হয় পরমাণু আলোককণা সংঘর্ষ। এক্ষেত্রে m_0-র স্থলে আমাদের প্রয়োগ করতে হবে সমগ্র পরমাণুটির ভর, M। কিন্তু পরমাণুর ভর ইলেকট্রনের তুলনায় বহুসহস্রগুণ বা লক্ষগুণ অধিক এজন্য এই বিক্ষুরণে তরঙ্গদৈর্ঘ্যের যে পরিবর্তন হয় তা পরীক্ষার দ্বারা নির্ণয় করা অসম্ভব।

এই সময়েই প্রতিটি বিচ্ছুরণ কোণেই পরিবর্তিত ও অপরিবর্তিত তরঙ্গদৈর্ঘ্যের রঞ্জনরশ্মির অস্তিত্ব দেখা যায়। কম্পটন প্রক্রিয়ায় অংশগ্রহণকারী ইলেকট্রনটির ভিতর ভরবেগ সঞ্চারিত হবার ফলে এটিও বিচ্ছুরিত হয়। এটি কোন একটি নির্দিষ্ট কোণে নির্দিষ্ট শক্তি নিয়ে বেরিয়ে আসে, পরীক্ষাগারে এইরকম উৎক্ষিপ্ত ইলেকট্রনের শক্তি মাপা সম্ভব হয়েছে। এক্ষেত্রেও উপরিলিখিত সমীকরণগুলি ব্যবহার ক'রে উৎক্ষিপ্ত ইলেকট্রনের শক্তি গণনা করা যায় এবং দেখা যায় যে পরীক্ষালব্ধ পরিমাণের সঙ্গে এই তাত্ত্বিক পরিমাণ সামঞ্জস্যপূর্ণ।

কম্পটন প্রক্রিয়ায় আলোককণাটির সম্পূর্ণ ধ্বংসসাধন ঘটে না, শুধু বিচ্ছুরিত আলোককণার স্পন্দনাঙ্ক হ্রাস পায়। কিন্তু আলোকবিদ্যুৎ প্রক্রিয়ায় অথবা জোড়া-সৃষ্টি প্রক্রিয়ায় প্রক্রিয়াটি ঘটার পর আলোককণাটির আর কোন অস্তিত্ব থাকে না, এর সমস্ত শক্তি উৎপন্ন ফোটোইলেকট্রন অথবা ইলেকট্রন পজিট্রন জোড়ার ভিতর সঞ্চারিত হয়।

ওজে প্রক্রিয়া (Auger effect)

পূর্ব্ববর্ত্তী আলোচনা থেকে আমরা দেখেছি যখনই পরমাণুর অন্তঃস্থ একটি সেলের ভিতর থেকে একটি ইলেকট্রন উৎখাত হয় তখনই এটি রঞ্জনরশ্মি বিকিরণক্ষম অবস্থায় এসে পৌছায়, অর্থাৎ এইরকম আয়নিত অবস্থায় অপর একটি সেল থেকে ইলেকট্রনের পরাবর্ত্তন ঘটলে রঞ্জনরশ্মি সৃষ্টি হতে পারে। আয়নিত অবস্থায় এইভাবে পরমাণুর ভিতর যে বিকিরণযোগ্য অতিরিক্ত শক্তি সঞ্চারিত থাকে তা আলোককণা হিসাবে বিকিরিত না হয়ে ঐ পরমাণুরই অপর একটি ইলেকট্রনের ভিতর সঞ্চারিত হতে পারে এবং এই শক্তির প্রভাবে সেই ইলেকট্রনটি পরমাণুর ভিতর থেকে নির্গত হয়ে আসতে পারে। এই ধরণের প্রক্রিয়া বাস্তবে ঘটে এবং একে বলা হয় ওজে প্রক্রিয়া। ওজে প্রক্রিয়া স্বাভাবিক রঞ্জনরশ্মি বিকিরণ পদ্ধতির বিকল্প অপর একটি প্রক্রিয়া, এটি কোন আভ্যন্তরীণ আলোকবিদ্যুৎ প্রক্রিয়া নয়, অর্থাৎ প্রথমে একটি রঞ্জনরশ্মি আলোককণা উৎপন্ন হয় এবং সেটি পুনরায় ঐ পরমাণুর ভিতরই আলোকবিদ্যুৎ প্রক্রিয়ার দ্বারা শোষিত হয়ে ওজে ইলেকট্রনের সৃষ্টি করে, এরকম ব্যাখ্যা করা ভুল। ওজে প্রক্রিয়া শুধু আয়নিত পরমাণুর ভিতরেই ঘটতে পারে এবং এই প্রক্রিয়ার ফলে পরমাণুটি দ্বিগুণ আয়নিত হয়ে পড়ে। বিজ্ঞানী ওজে একটি মেঘকক্ষের ভিতর (অষ্টম অধ্যায় দ্রষ্টব্য)- রঞ্জনরশ্মি চালিত ক'রে কক্ষস্থ কিছু পরমাণুকে আয়নিত করেন, তিনি লক্ষ্য করেন যে মেঘকক্ষের ছবিগুলির ভিতর অনেক ক্ষেত্রেই একই বিন্দু থেকে উৎপন্ন দুটি

ইলেকট্রনের গতিপথের ছবি দেখতে পাওয়া যাচ্ছে। প্রথম ইলেকট্রনটি পরমাণুর উপর নিক্ষিপ্ত রঞ্জনরশ্মির আলোকবিদ্যুৎ প্রক্রিয়ার প্রভাবে উৎপন্ন হয়, দ্বিতীয় ইলেকট্রনটির সৃষ্টি হয় ওজে প্রক্রিয়ায়। যেকোন প্রক্রিয়ার ফলেই যদি পরমাণুর অভ্যন্তস্থ সেলগুলি থেকে কোন একটি ইলেকট্রন উৎখাত হয় তবে এইভাবে আয়নিত পরমাণুর পক্ষে ওজে প্রক্রিয়ায় ইলেকট্রন নির্মোচন করা সম্ভব।

রঞ্জনরশ্মির শক্তি নিরূপণ

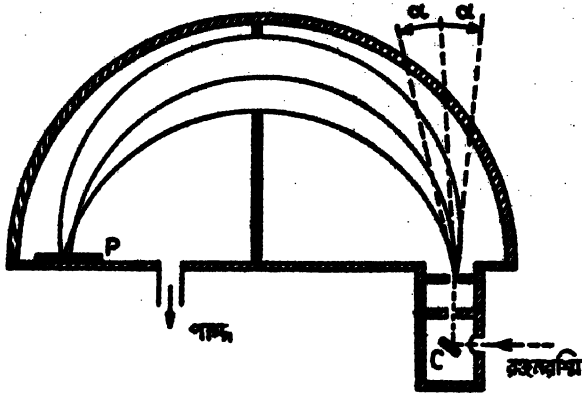
পরমাণুর রঞ্জনরশ্মি শক্তিস্তরগুলি 6·4 চিত্রে বর্ণনা করা হয়েছে, এই স্তরগুলির শক্তি মাপার একটি অন্যতম উপায় হ'ল এদের ভিতর থেকে আলোকবিদ্যুৎ প্রক্রিয়াজাত ইলেকট্রনগুলির শক্তি নির্ণয় করা। এছাড়া শোষণের পরীক্ষাতে K, L ইত্যাদি বিভিন্ন শোষণের সীমা নির্দ্ধারণ ক'রে কিভাবে শক্তিস্তরগুলি নির্দ্দেশ করা যায় সে পদ্ধতি পূর্ব্বে বিস্তৃতভাবে বর্ণনা করা হয়েছে। K-সেলে আলোকবিদ্যুৎ প্রক্রিয়ার সূত্রটি নিম্নলিখিত উপায়ে প্রকাশ করা যায়

$$h\nu = E_k + T \qquad \cdots \qquad 6\text{·}17$$

E_k হ'ল K-সেল ইলেকট্রনের বন্ধনশক্তি, T উৎখাত ইলেকট্রনটির গতিশক্তি এবং ν আপতিত রঞ্জনরশ্মি আলোককণার স্পন্দনাঙ্ক। ν এবং T জানা থাকলে E_k সহজেই পরিমাপ করা যায়। অন্যান্য সেলগুলি থেকে উৎখাত ইলেকট্রনের জন্যও একইরকম সমীকরণ লেখা যায়।

দ্বিতীয় অধ্যায়ে যেসব পদ্ধতিতে বিভিন্ন আয়নের শক্তি নির্ণয়ের বিবরণ দেওয়া হয়েছে সেগুলিই সামান্য পরিবর্ত্তন ক'রে ইলেকট্রনের গতিশক্তি অথবা গতিবেগ নির্ণয়ের জন্য ব্যবহৃত হতে পারে। 6·11 চিত্রে এরকম একটি আয়োজন দেখান হয়েছে, এটি অনেকটা 2·6 চিত্রের ভর মাপনীর আয়োজনের মত, ইলেকট্রনের শক্তি নির্ণয়ের জন্য এই যন্ত্রটির ব্যবহারের বিবরণ দিয়েছেন রাদারফোর্ড এবং রবিনসন*। একটি শূন্যাধারের ভিতর একটি ধাতুর পাত C-এর উপর বাইরে থেকে রঞ্জনরশ্মি এসে আলোক-বিদ্যুৎ প্রক্রিয়া সৃষ্টি করে। এভাবে উৎপন্ন ফোটোইলেকট্রনগুলি একটি সরু ফাঁকের ভিতর দিয়ে গিয়ে চিত্রের সমতলের সঙ্গে লম্ব একটি সীমাবদ্ধ চৌম্বকক্ষেত্রের ভিতর প্রবেশ করে এবং চৌম্বকক্ষেত্রের প্রভাবে একটি

* E. Rutherford & H. Robinson, Phil. Mag. 26, 717 (1913)

বৃত্তীয় পথে বেঁকে অবশেষে ফোটোগ্রাফীর প্লেট (অথবা একটি আয়নী কক্ষ) P-এর উপর আপতিত হয়। প্রতিটি ইলেকট্রন যাদের গতিবেগ অভিন্ন সেগুলি যন্ত্রের আয়োজনে একটি অর্দ্ধবৃত্ত অতিক্রম ক'রে P-এর উপর নির্দিষ্ট একটি বিন্দুতে এসে পড়বে। নির্দিষ্ট ধ্রুব চৌম্বকক্ষেত্রে যে

চিত্র 6·11 : রাদারফোর্ড ও রবিনসন ব্যবহৃত ফোটোইলেকট্রনের শক্তি নির্দ্ধারণের পরীক্ষার আয়োজন।

ইলেকট্রনের গতিবেগ যত বেশী হবে তার গতিপথের ব্যাসার্দ্ধও তত অধিক হবে, আপতন বিন্দুর অবস্থান লক্ষ্য ক'রে এই ব্যাসার্দ্ধ সহজেই নির্ণয় করা যায়। চৌম্বকক্ষেত্রে ইলেকট্রনের বৃত্তীয় গতির সুপরিচিত সমীকরণ হ'ল

$$\frac{Bev}{c} = \frac{mv^2}{R}$$

$$p = mv = \frac{BeR}{c} \qquad 6·18$$

এখানে R গতিপথের বক্রতার ব্যাসার্দ্ধ। 6·18 সম্বন্ধটি আপেক্ষিকতা তত্ত্বেও প্রয়োজ্য, সেক্ষেত্রে $m = m_0\,[1 - v^2/c^2]^{-\frac{1}{2}}$। সুতরাং 2·39 সমীকরণ প্রয়োগ ক'রে আমরা কণাটির গতিশক্তির জন্য লিখতে পারি

$$T = \text{গতিশক্তি} = E - m_0c^2$$

$$= m_0c^2\left[\left\{1 + \frac{(pc)^2}{(m_0c^2)^2}\right\}^{\frac{1}{2}} - 1\right] \qquad 6·19$$

6·18 ও 6·19 সম্বন্ধদ্বয় থেকে আমরা পাই

$$T = m_0c^2\left[\left\{1 + \frac{B^2e^2R^2}{m_0^2c^4}\right\}^{\frac{1}{2}} - 1\right] \qquad 6·20$$

সুতরাং চৌম্বকক্ষেত্রের তীব্রতা B, ইলেকট্রনের স্থির ভর m_0 এবং R-এর পরিমাণ থেকে 6·20 সূত্রটি প্রয়োগ ক'রে গতিশক্তি T-এর পরিমাণ নির্দ্ধারিত হয় এবং এর দ্বারা 6·17 সম্বন্ধের সাহায্য নিয়ে E_B নির্ণয় করা যায় যদি ν জানা থাকে। সাধারণতঃ কোন জ্ঞাত স্পন্দনাঙ্কের K_a রেখার রঞ্জনরশ্মি এই পরীক্ষায় ব্যবহৃত হয়। ফোটোইলেকট্রনগুলি K, L, M ইত্যাদি যেকোন স্তর থেকে আসতে পারে, প্রত্যেক ক্ষেত্রেই T-এর পরিমাণ থেকে ঐসব স্তরগুলির বন্ধনশক্তি নির্ণীত হয়। বিভিন্ন শক্তিস্তর থেকে উৎপন্ন ইলেকট্রনগুলি ফোটোগ্রাফীর পাতের উপর পৃথক পৃথক অঞ্চলে ফোকাসে আসে এবং কতগুলি দাগ সৃষ্টি করে এবং ফাঁক থেকে ঐ দাগগুলির দূরত্ব মেপে ইলেকট্রনের গতিপথের ব্যাসার্দ্ধ জানা যায়।

এই আয়োজনের বিশ্লিষ্টকরণ ক্ষমতা নির্ভর করে নানা অবস্থার উপর ; বিশ্লিষ্টকরণ ক্ষমতা অধিক হয় যখন উৎসটি হয় খুব সরু, বক্রতার ব্যাসার্দ্ধ বৃহৎ এবং বিভিন্ন উৎক্ষিপ্ত ইলেকট্রনের পারস্পরিক কৌণিক বিচ্যুতি স্বল্প। যেসব ইলেকট্রনগুলির গতিপথ মূল লম্ব রশ্মিটির উভয়দিকে স্বল্প α কোণে নত থাকে যেমন 6·11 চিত্রে দেখান হয়েছে, সেগুলিও কেন্দ্রীয় ইলেকট্রনটির সঙ্গে একই ফোকাসে এসে উপনীত হয়, অবশ্য যদি কোণ α-র পরিমাণ যথেষ্ট কম হয়। তবে যেসব ইলেকট্রনগুলির গতিপথ চিত্রের সমতলে থাকে সেগুলির পক্ষেই ফোকাসে আসা সম্ভব। আরেকটি সুবিধা হ'ল যে, এই ধরণের যন্ত্রে বিশ্লিষ্টকরণ ক্ষমতা ইলেকট্রনের শক্তি নিরপেক্ষ। 6·18 সূত্রের সাহায্যে এর কারণ অনুধাবন করা যেতে পারে ; যদি ইলেকট্রনের ভরবেগ দ্বিগুণ ক'রে দেওয়া যায় তাহলে চৌম্বকক্ষেত্রের তীব্রতা দ্বিগুণ করলে গতিপথের ব্যাসার্দ্ধ অপরিবর্তিত থাকবে। এই গতিপথগুলির প্রকৃতিই প্রতিবিম্বের বিস্তৃতি এবং তাথেকে যান্ত্রিক আয়োজনের বিশ্লিষ্টকরণ ক্ষমতা নির্দ্ধারণ করে, সুতরাং গতিপথ অপরিবর্তিত থাকলে বিশ্লিষ্টকরণ ক্ষমতার কোন ব্যতিক্রম ঘটে না।

C অঞ্চলে বিভিন্ন মৌলের তৈরী ধাতবহের পাত রেখে ঐসব মৌলের রঞ্জনরশ্মি শক্তিস্তরগুলি নির্দ্ধারণ করা যায়। আবার যদি C পাতটি এমন কোন পদার্থে গঠিত হয় যে এর পরমাণুর বিভিন্ন সেলে ইলেকট্রনগুলির বন্ধনশক্তি নির্ভুলভাবে জ্ঞাত তবে এই পরীক্ষা দ্বারা কোন অজ্ঞাত রঞ্জনরশ্মি বিকিরণের তরঙ্গদৈর্ঘ্য মাপা সম্ভব, অর্থাৎ তখন 6·17 সমীকরণে E_B জানা আছে কিন্তু ν অজ্ঞাত। এই পদ্ধতিতে পরমাণুকেন্দ্রীন থেকে নির্গত অত্যধিক স্পন্দনাঙ্কবিশিষ্ট গামারশ্মির তরঙ্গদৈর্ঘ্য অপেক্ষাকৃত সহজে এবং নির্ভুলভাবে

মাপা যায়। এছাড়া তেজস্ক্রিয়তার ফলে বিভিন্ন কেন্দ্রীন থেকে শক্তিশালী ইলেকট্রন ও পজিট্রন নির্গত হয় তাদের শক্তিও এই পদ্ধতিতে মাপা হয়। সেক্ষেত্রে C পাতের উপর তেজস্ক্রিয় পদার্থের পাতলা একটি প্রলেপ রাখা হয় এবং নির্গত কণাগুলির শক্তি একইভাবে মাপা হয়।

প্রশ্নমালা

(1) ইউরেনিয়ামের K শোষণের সীমা 0.107×10^{-8} সেমি। সর্ব্বনিম্ন কত বিভব রঞ্জনরশ্মি টিউবের মধ্যে প্রয়োগ করলে ইউরেনিয়াম ঘাতবহ থেকে এর K-শ্রেণীটি উৎপন্ন হবে?

[1,16,100 ভোল্ট]

(2) একটি মলিবিডেনাম ঘাতবহ থেকে উৎপন্ন K-বিকিরণ ($\lambda = 0.708 \times 10^{-8}$ সেমি) কার্ব্বনের মধ্য থেকে বিচ্ছুরিত হচ্ছে এবং বিচ্ছুরিত বিকিরণ 90° কোণে একটি ক্যালসাইট স্ফটিকের দ্বারা বিশ্লেষণ করা হচ্ছে। বিচ্ছুরণ প্রক্রিয়ায় তরঙ্গদৈর্ঘ্যের কতটা পরিবর্তন ঘটে গণনা কর।

[0.024×10^{-8} সেমি]

(3) ধরা যাক একটি 50 কিলোইলেকট্রন ভোল্ট রঞ্জনরশ্মির টিউবে উৎপন্ন সর্ব্বনিম্ন তরঙ্গদৈর্ঘ্যের পরিমাণ 0.247A°, এথেকে প্ল্যাংকের ধ্রুবকের পরিমাণ নির্ণয় কর।

[6.58×10^{-34} জুল/সেক]

(4) 0.09A° তরঙ্গদৈর্ঘ্য সমন্বিত রঞ্জনরশ্মির একটি ধারা একটি কার্ব্বন ঘাতবহের উপর আপতিত হয়েছে। বিচ্ছুরিত রশ্মিকে আপতনের দিকের সাথে 54° কোণে লক্ষ্য করা হচ্ছে; (1) বিচ্ছুরিত রশ্মির তরঙ্গদৈর্ঘ্য নির্ণয় কর; (2) আপতিত এবং বিচ্ছুরিত আলোককণার শক্তি এবং ভরবেগ কত?

[$\lambda = 0.1$A° : (6) $h\nu_0 = 137$ কিলোইভি
$h\nu = 124.2$ কিলোইভি]

(5) প্ল্যাটিনামের ক্ষেত্রে K-শোষণের সীমা 0.15×10^{-8} সেমি, ন্যূনপক্ষে কত বিভব প্রয়োগ করলে প্ল্যাটিনামের K-শ্রেণী উৎপন্ন হতে পারে?

[82,800 ভোল্ট]

(6) 50,000 ভোল্ট বিভব ব্যবধান একটি রঞ্জনরশ্মি টিউবের মধ্যে প্রয়োগ করা হয়েছে, ন্যূনতম কত তরঙ্গদৈর্ঘ্যের রঞ্জনরশ্মি এতে উৎপন্ন হবে?

[0.248A°]

(7) 0·2A° তরঙ্গদৈর্ঘ্যের রঞ্জনরশ্মির সীসার ভিতর শোষণের সহগ 1·30/সেমি। কতটা সীসার পুরুত্ব অতিক্রম করলে রঞ্জনরশ্মির তীব্রতা প্রাথমিক পরিমাণের $\frac{1}{20}$ অংশে পরিণত হবে ?

[2·3 সেমি]

(8) 0·09A° তরঙ্গদৈর্ঘ্যের রঞ্জনরশ্মি কার্বন বিচ্ছুরকের উপর এসে পড়ছে, একটি নির্দিষ্ট কোণে বিচ্ছুরিত রঞ্জনরশ্মির তরঙ্গদৈর্ঘ্য 0·10A°। প্রাথমিক দিকের সঙ্গে কত ডিগ্রী কোণে বিচ্ছুরিত রশ্মি লক্ষ্য করা হয়েছিল ?

[54° 19′]

(9) 1 এমইভি শক্তিসম্পন্ন রঞ্জনরশ্মির একটি ধারা একটি বিচ্ছুরকের উপর আপতিত হয়েছে এবং তাথেকে কম্পটন বিচ্ছুরিত রশ্মি প্রাথমিক দিকের সঙ্গে 45° কোণে লক্ষ্য করা যাচ্ছে। এক্ষেত্রে পিছু-হটা কম্পটন ইলেকট্রন কত পরিমাণ শক্তি বহন করে ?

[$E_e = 0·37$ এমইভি]

(10) একটি রঞ্জনরশ্মি টিউবের ভিতর বিভব ব্যবধান 250 কিলোভোল্ট এবং বিদ্যুৎপ্রবাহ 20 মিলি এ্যাম্পিয়ার। প্রতি সেকেণ্ডে কতগুলি ইলেকট্রন ঘাতবহটিকে আঘাত করেছে ? যদি সমস্ত গতিশক্তিই তাপে রূপান্তরিত হয় তবে প্রতি সেকেণ্ডে ঘাতবহের মধ্যে কত তাপ উৎপন্ন হবে ?

[$1·25 \times 10^{17}$/সেক, $1·2 \times 10^{3}$ ক্যালরী/সেক]

সপ্তম অধ্যায়

পরমাণু কেন্দ্রীন

রাদারফোর্ডের পরীক্ষা থেকে প্রমাণিত হয় যে পরমাণুর কেন্দ্রে ধন-আহিত একটি অতি ক্ষুদ্র অঞ্চল আছে যার ভিতর পরমাণুর প্রায় সমস্ত ভরই কেন্দ্রীভূত, একে বলা হয়েছে পরমাণু কেন্দ্রীন। পরমাণুস্থ ইলেকট্রনগুলি এই কেন্দ্রীন থেকে অনেক দূরে কতগুলি শক্তিস্তরে অবস্থান করে এবং কেন্দ্রীনের ধন আধানকে আবৃত ক'রে রাখে। পরমাণু কেন্দ্রীন সম্বন্ধে জ্ঞান লাভ করা অনেক বেশী দুরূহ কারণ জগতে পরমাণুঘটিত যেসব ক্রিয়া আমরা লক্ষ্য ক'রে থাকি তাদের ভিতর কেন্দ্রীন সচরাচর সরাসরি কোন অংশ গ্রহণ করে না। আমরা পূর্ব্ববর্ত্তী অধ্যায়গুলিতে পরমাণুর উত্তেজনার বিষয় বলেছি, প্রতি ক্ষেত্রেই দেখা যায় যে এই উত্তেজনা হ'ল আসলে কক্ষীয় ইলেকট্রনগুলির অতিরিক্ত শক্তি অর্জ্জনের ফল। এইভাবে বিকিরণ বর্ণালী এবং ওজে প্রক্রিয়ার সৃষ্টি হয়, এসব ক্ষেত্রে কেন্দ্রীন সম্বন্ধে জ্ঞাতব্য শুধু এই যে এর নির্দিষ্ট পরিমাণের ধন আধান রয়েছে। অবশ্য বোর তত্ত্বের আলোচনায় আমরা দেখেছি যে কেন্দ্রীনের ভরের পার্থক্য হেতু হাইড্রোজেন ও ডয়টেরণ বর্ণালীর মধ্যে অত্যন্ত সূক্ষ্ম পার্থক্যের সৃষ্টি হয়। তাছাড়া কেন্দ্রীনের নির্দিষ্ট পরিমাণ কৌণিক ভরবেগ এবং চৌম্বকভ্রামক থাকে, এই ভ্রামক ইলেকট্রনের কক্ষীয় ও ঘূর্ণজনিত ভ্রামকের সঙ্গে ক্রিয়া ক'রে ইলেকট্রনের শক্তিস্তরগুলিকে সামান্য পরিমাণে পরিবর্ত্তিত ক'রে দিতে পারে, এই প্রক্রিয়াকে পূর্ব্বে বর্ণালীর অতি সূক্ষ্ম বিভাজন আখ্যা দেওয়া হয়েছে। নানারকম উন্নত ধরণের যন্ত্রপাতি ও পরীক্ষার আয়োজনের দ্বারা বর্ত্তমানে এই অতি সূক্ষ্ম বিভাজন অত্যন্ত নির্ভুলভাবে নিরূপণ করা সম্ভব এবং তাথেকে পরমাণুকেন্দ্রীনের কৌণিক ভরবেগ এবং চৌম্বক ভ্রামক নির্ণীত হয়, সমস্ত স্থায়ী কেন্দ্রীনের মধ্যে এগুলির পরিমাণ এখন নির্ভুলভাবে জ্ঞাত। পরমাণুদের রাসায়নিক ক্রিয়াকলাপে কেন্দ্রীনের কোন প্রভাব নেই। তাপ, বিদ্যুৎপ্রবাহ, আলোকশক্তি ইত্যাদির প্রভাবে পরমাণুকে উত্তেজিত করা সম্ভব, কিন্তু এরা কেন্দ্রীনকে সাধারণতঃ প্রভাবিত করতে সমর্থ হয় না। এসব কারণে কেন্দ্রীনের ধর্ম্মগুলি পরীক্ষা করা এবং এদের প্রকৃতি নির্ণয় করা অত্যন্ত কঠিন। রাদার-ফোর্ডের পরীক্ষাতেই সর্ব্বপ্রথম কেন্দ্রীন সম্বন্ধে জ্ঞানলাভ করার একটি প্রকৃষ্ট

উপায় আবিষ্কৃত হয়। এই পরীক্ষা থেকে দেখা যায় যে, অত্যন্ত শক্তিশালী কণার দ্বারা কেন্দ্রীনকে আঘাত করলে ঐ কণাগুলি কেন্দ্রীনের বাইরের ইলেকট্রনের স্তরগুলিকে ভেদ ক'রে কেন্দ্রীনের অতি নিকটে চলে আসতে পারে এবং এর বলক্ষেত্রের সঙ্গে ক্রিয়া করতে পারে। এসব সংঘর্ষের ফলাফল বিশ্লেষণ ক'রে যে কেন্দ্রীনের প্রকৃতি সম্বন্ধে নানারকম জ্ঞান লাভ করা সম্ভব তা আমরা আগেই বলেছি। এইভাবে প্রমাণিত হয় যে কেন্দ্রীনের ব্যাসার্দ্ধ 10^{-13} সেমির নিকটবর্ত্তী। 10^{-13} সেন্টিমিটার রাশিটিকে কেন্দ্রীন-বিজ্ঞানে দৈর্ঘ্যের একক হিসাবে নেওয়া হয়, একে বলা হয় এক ফের্মি। পারমাণবিক ভর থেকে যদি কক্ষীয় ইলেকট্রনগুলির ভর বাদ দেওয়া যায় তবে কেন্দ্রীনের ভর পাওয়া যায় (ইলেকট্রনের বন্ধনশক্তি নগণ্য), কেন্দ্রীনের ব্যাসার্দ্ধ এক ফের্মি ধরলে ঐ ভরের পরিমাণ থেকে কেন্দ্রীনস্থ পদার্থের যে ঘনত্ব নির্ণীত হয় তার পরিমাণ প্রায় 10^{14} কিলোগ্রাম/সিসি। সুতরাং কেন্দ্রীনের ভিতর পদার্থ এক অস্বাভাবিক ঘনত্বে অবস্থান করে। এই অস্বাভাবিক ঘনত্বে কেন্দ্রীনস্থ পদার্থের ভিতর যে ধরণের বলসমূহ ক্রিয়া করে তাদের প্রকৃতিও সম্পূর্ণ স্বতন্ত্র, এই ধরণের বল প্রকৃতির ভিতর অন্যত্র কোথাও দৃষ্ট হয় না। তবে নানারকম পরীক্ষালব্ধ ফল থেকে আমরা ঐসব বলের প্রকৃতি সম্বন্ধে কিছুটা অনুধাবন করতে পারি।

কেন্দ্রীনের ধন আধান সৃষ্টি হয় এর ভিতর বহুসংখ্যক প্রোটনের অবস্থিতি থেকে, কেন্দ্রীনের ভিতর যদি শুধুমাত্র বিদ্যুৎচুম্বকীয় বলের অস্তিত্ব থাকত তবে ঐ ধন আধানসমূহের পারস্পরিক বিকর্ষণের ফলে কেন্দ্রীন ভেঙ্গে বিচ্ছিন্ন হয়ে যেত। যেহেতু বাস্তবে তা ঘটে না সুতরাং সহজেই অনুমান করা যায় যে কেন্দ্রীনের ভিতর তীব্র আকর্ষণী বলের অস্তিত্ব রয়েছে যা বিদ্যুৎচুম্বকীয় বিকর্ষণ সত্ত্বেও কেন্দ্রকণাগুলিকে আটকে রাখে। সুতরাং কেন্দ্রীনের আকর্ষণী বল বিদ্যুৎচুম্বকীয় বিকর্ষণের তুলনায় বেশী তেজশালী। কেন্দ্রীনের আকর্ষণী বলের সম্বন্ধে বর্ত্তমানেও ব্যাপক গবেষণা চলছে, এদের যাবতীয় ধর্ম্মাবলী এখনও সম্পূর্ণ সঠিকভাবে জানা সম্ভব হয়নি।

আমরা আগেই মন্তব্য করেছি যে, কেন্দ্রীন হ'ল কতগুলি কেন্দ্রকণা, যেমন প্রোটন ও প্রোটনের প্রায় সমভরবিশিষ্ট অপর একটি কণা নিউট্রনের সমন্বয়ে গঠিত, এরা পারস্পরিক আকর্ষণের প্রভাবে একত্র থেকে বিভিন্ন কেন্দ্রীনের সৃষ্টি করে। অর্থাৎ কেন্দ্রীন একটি সর্বত্র সমগুণসম্পন্ন পদার্থপিণ্ড নয়, বরঞ্চ একটি অণুর ভিতর যেভাবে একাধিক পরমাণু পারস্পরিক আকর্ষণের প্রভাবে আবদ্ধ থাকে, কেন্দ্রীনের ভিতরেও কণাগুলি

সেইজন্য পারস্পরিক বলের প্রভাবে আবদ্ধ থাকে, কিন্তু নিজেদের বৈশিষ্ট্যগুলি মোটামুটি বজায় রাখে। অবশ্য অণু এবং কেন্দ্রীনের ভিতর এই সাদৃশ্য বেশীদূর টেনে নেওয়া উচিত নয় কারণ ওই দুই ক্ষেত্রে ক্রিয়াশীল বলগুলির প্রকৃতি সম্পূর্ণ পৃথক। কোয়ান্টাম বলবিজ্ঞানের সাহায্যে শুধুমাত্র তড়িৎচুম্বকীয় বলগুলির অস্তিত্ব মেনে নিয়ে অণুর অভ্যন্তরস্থ পরমাণুগুলির ভিতর আকর্ষণী বলের প্রকৃতি সম্বন্ধে অত্যন্ত নির্ভুল সিদ্ধান্তে উপনীত হওয়া যায়। দুটি পরমাণুর পরস্পরের মধ্যে ক্রিয়াশীল রাসায়নিক বলগুলি সম্বন্ধে এখন আমরা অনেক কিছুই জানি। কিন্তু কেন্দ্রকণাগুলির ভিতর আকর্ষণী বলের পরিমিতি, প্রকৃতি এবং কত দূরত্বে তা ক্রিয়া করে, এইসব বিষয়গুলি সম্বন্ধে আমাদের জ্ঞান এখনও খুব স্পষ্ট নয়। তাছাড়া কেন্দ্রীনস্থ পদার্থের বিপুল ঘনত্বের জন্যও নানারকম নূতন সমস্যার উদ্ভব হয়। কিন্তু এসব কারণেই আবার কেন্দ্রীন-বিজ্ঞানের গবেষণা বর্ত্তমানে অত্যন্ত চিত্তাকর্ষক এবং আজও বিভিন্ন আবিষ্কারের ফলে কেন্দ্রীনের নানারকম নূতন নূতন ধর্ম্মাবলী সম্বন্ধে জানা যাচ্ছে যা কেন্দ্রীনের প্রকৃতির উপর নূতন আলোকপাত করছে।

কেন্দ্রীনের ওজন প্রোটনের ওজনের সঙ্গে তুলনীয় এবং এর আধান প্রোটনের আধানের কোন না কোন পূর্ণসংখ্যার গুণিতকের সমান, এইসব তত্ত্ব বিচার ক'রে বিজ্ঞানীরা বহুদিন আগে থেকেই সিদ্ধান্তে উপনীত হয়েছিলেন যে কেন্দ্রীনের ভিতর প্রোটনের অস্তিত্ব আছে। কিন্তু প্রতি কেন্দ্রীনের ক্ষেত্রেই (অবশ্য হাইড্রোজেন কেন্দ্রীনকে বাদ দিয়ে) দেখা যায় যে এর মোট ভর এর আধানের পরিমাণ অনুযায়ী যতগুলি প্রোটন এর ভিতর থাকতে পারে তাদের সম্মিলিত ভরের তুলনায় অনেক বেশী, অধিকাংশ ক্ষেত্রেই দ্বিগুণের বেশী। উদাহরণস্বরূপ, হিলিয়াম কেন্দ্রীনের ভর প্রায় 4 এএমইউ এবং প্রোটনের ভর প্রায় 1 এএমইউ; হিলিয়াম কেন্দ্রীনের আধান যেহেতু $+2e$, এতে মাত্র দুটি প্রোটনের অস্তিত্ব আছে। এখন প্রশ্ন হচ্ছে হিলিয়ামের বাকী ভর কোথা থেকে আসছে? এই সমস্যার সমাধান হয় যখন বিজ্ঞানীরা নিউট্রন আবিষ্কার করেন, এই আবিষ্কারের বিবরণ পরবর্ত্তী একটি অধ্যায়ে দেওয়া হবে। নিউট্রনের ভর প্রোটনের প্রায় সমান কিন্তু এর আধান শূন্য

$$M_n - M_p = 0{\cdot}00138 \text{ এমইউ} = 1{\cdot}28 \text{ এমইভি}$$

কেন্দ্রীনের ভিতর প্রোটন ও নিউট্রন উভয়েরই অস্তিত্ব আছে একথা স্বীকার ক'রে নিলে হিলিয়ামের ভরের একটা ব্যাখ্যা পাওয়া যায়। হিলিয়াম

কেন্দ্রীনে দুটি প্রোটন ও দুটি নিউট্রন থাকলে এর পারমাণবিক ভর হবে 4। বিভিন্ন সংখ্যক প্রোটন এবং নিউট্রনের সমবায়ের দ্বারা বিভিন্ন কেন্দ্রীনের সৃষ্টি হয়ে থাকে।

কেন্দ্রীনের বন্ধনশক্তি

কেন্দ্রীনের ভর এর অভ্যন্তরস্থ কেন্দ্রকণাগুলির (নিউট্রন ও প্রোটন) মুক্ত অবস্থার মোট ভরের তুলনায় সামান্য কিছু কম হয়, এই দুই ভরের বিয়োগফলকে ভরস্বল্পতা আখ্যা দেওয়া হয় এবং ভরস্বল্পতাকে শক্তির এককে প্রকাশ করলে তাকে বলা হয় কেন্দ্রীনের মোট বন্ধনশক্তি। অর্থাৎ কেন্দ্রীনের বদ্ধ দশা থেকে কেন্দ্রকণাগুলিকে সম্পূর্ণ মুক্ত ক'রে আনতে হলে কেন্দ্রীনের ভিতর ঐ পরিমাণ শক্তি সঞ্চারিত করতে হবে। উদাহরণস্বরূপ, ইউরেনিয়াম 238 কেন্দ্রীনে মোট 92টি প্রোটন এবং 146টি নিউট্রন আছে। মুক্ত অবস্থায় এই কণাগুলির একত্র ভর 240·0099 এএমইউ এবং U^{238} কেন্দ্রীনের ভর 238·0749 এএমইউ, অর্থাৎ U^{238} কেন্দ্রীনের ভরস্বল্পতা 1·935 এএমইউ এবং তাথেকে কেন্দ্রকণাপ্রতি গড় বন্ধনশক্তির পরিমাণ

$$B = \frac{1{\cdot}935 \times 931{\cdot}3}{238} = 7{\cdot}57 \text{ এমইভি}$$

সাধারণভাবে কণাপ্রতি গড় বন্ধনশক্তির জন্য আমারা লিখতে পারি

$$B = [M_p Z + M_n(A - Z) - M]c^2/A$$

এখানে M কেন্দ্রীনের পারমাণবিক ভর (গ্রাম), A ও Z হ'ল যথাক্রমে এর মোট নিউট্রন-প্রোটন সংখ্যা এবং পারমাণবিক সংখ্যা। বন্ধনশক্তির ধারণা পরমাণুর শক্তিস্তরগুলির ক্ষেত্রেও প্রয়োগ করা যায়। চতুর্থ অধ্যায়ের আলোচনা অনুসরণ ক'রে আমরা দেখি যে হাইড্রোজেনের ভূমিস্তরে ইলেকট্রনের বন্ধনশক্তির পরিমাণ 13·6 ইভি, এর সঙ্গে উপরিলিখিত U^{238} কেন্দ্রীনে একটি কণার গড় বন্ধনশক্তির পরিমাণ তুলনা করলে বোঝা যাবে যে কেন্দ্রকণাগুলির বন্ধন কত অধিক। এথেকেই বোঝা যায় যে কেন্দ্রীনের বলগুলি বৈদ্যুতিক বলের তুলনায় বহুগুণ বেশী তেজশালী। কেন্দ্রকণাগুলির ভিতর তীব্র আকর্ষণী বলের উপস্থিতি থাকার ফলে কেন্দ্রীনের ভিতর একটি কেন্দ্রকণার মোট শক্তি যা এর গতিশক্তি এবং বিভবশক্তির যোগফল, এর পরিমাণ হয় ঋণরাশি, সুতরাং এটিকে উৎখাত করতে নির্দিষ্ট পরিমাণ বহিঃশক্তির প্রয়োজন হয়। আইনস্টাইনের সূত্র অনুযায়ী

কেন্দ্রকণাগুলির ভরের কিছু অংশ বিভবশক্তিতে রূপান্তরিত হবার জন্যই কেন্দ্রীনের ভিতর এই ভরক্ষুণ্ণতার উদ্ভব হয়। একাদশ অধ্যায়ে বিভিন্ন কেন্দ্রীনের জন্য ভরসংখ্যা বনাম কণাপ্রতি বন্ধনশক্তির একটি লেখ আঁকা হয়েছে, এতে দেখা যায় যে মোটামুটি ভরসংখ্যা 20-এর পর থেকে কণাপ্রতি বন্ধনশক্তি ভরসংখ্যার সাথে সাথে খুব সামান্যই পরিবর্তিত হচ্ছে। কেন্দ্রীনের বলগুলি যে খুব স্বল্পদূরপ্রসারী তা এই ঘটনাটি থেকে অনুধাবন করা যায়। এথেকে বোঝা যায় যে একটি কেন্দ্রকণা তার চারপাশে খুব ঘনিষ্ঠভাবে সন্নিহিত কণাগুলির সঙ্গেই শুধু বলক্রিয়ায় অংশ গ্রহণ করতে পারে। অপেক্ষাকৃত দূরে অবস্থিত একটি কেন্দ্রকণার সঙ্গে এর বলক্রিয়ার পরিমাণ অপেক্ষাকৃত অনেক কম হয়ে থাকে, এই কারণে এর বন্ধনশক্তি সব সময়ই মোটামুটি সমান থাকে এবং অপেক্ষাকৃত দূরবর্তী অঞ্চলে একাধিক নূতন কেন্দ্রকণা সংযোজিত হলেও সেগুলি এর বন্ধনশক্তির বিশেষ তারতম্য ঘটাতে সক্ষম হয় না। এই ঘটনাটিকে বলা হয় কেন্দ্রীনের বলসমূহের পরিপৃক্তভবন (saturation)। অবশ্য কেন্দ্রীনের ভিতরে কেন্দ্রকণার সংখ্যা যদি খুব কম হয় তাহলে সে অবস্থায় প্রতিটি কেন্দ্রকণাই অপর প্রতিটি কেন্দ্রকণার সঙ্গে পরিক্রিয়া ঘটাবার সুযোগ পায় এবং এ অবস্থায় নূতন একটি কেন্দ্রকণা সংযোজিত হলে গড় বন্ধনশক্তির দ্রুত তারতম্য ঘটতে পারে। কেন্দ্রকণার সংখ্যা মোটামুটি দশের নীচে থাকলে এই ঘটনাটি লক্ষ্য করা যায় এবং এই অঞ্চলে ভরসংখ্যার সাথে সাথে কণাপ্রতি বন্ধনশক্তি অতিদ্রুত পরিবর্তিত হতে দেখা যায়।

কেন্দ্রীনের ব্যাসার্দ্ধ

নানারকম পরীক্ষায় কেন্দ্রীনের ব্যাসার্দ্ধ মাপা সম্ভব। আলফাকণার বিচ্ছুরণের দ্বারা কিভাবে কেন্দ্রীনের আয়তন সম্বন্ধে জ্ঞানলাভ করা যায় সে সম্বন্ধে পূর্ব্বে বিস্তৃত আলোচনা করা হয়েছে। তবে আরও অনেক বেশী নির্ভুল জ্ঞানলাভ করা সম্ভব কেন্দ্রীনের উপর শক্তিশালী ইলেকট্রনের বিচ্ছুরণ ঘটিয়ে। এছাড়া আরও কতগুলি পদ্ধতিতে কেন্দ্রীনের আকার এবং আয়তন নির্ণয় করা সম্ভব। কেন্দ্রীনের ভিতর কেন্দ্রকণাগুলির মোট সংখ্যা অর্থাৎ মোট প্রোটন-নিউট্রন সংখ্যাকে বলা হয় এর ভরসংখ্যা, A। দেখা গেছে যে বিভিন্ন কেন্দ্রীনের ঘনায়তন মোটামুটি এদের ভরসংখ্যার সমানুপাতী অর্থাৎ $V \propto A$। কিন্তু একটি বর্ত্তুলের জন্য

$$V \propto R^3$$

যেখানে R বর্তুলটির ব্যাসার্ধ, সুতরাং

$$R^3 \propto A$$

$$R = R_0 A^{\frac{1}{3}} \qquad \cdots \quad 7\cdot1$$

এখানে R_0 একটি ধ্রুবক। 7·1 সূত্রটি কোন কেন্দ্রীনের ক্ষেত্রে প্রয়োগ ক'রে এর ব্যাসার্ধ মেপে R_0-এর পরিমাণ নির্দ্ধারণ করা যায়। নানা প্রকারের পরীক্ষালব্ধ পরিমাণ থেকে দেখা যায় যে বিভিন্ন কেন্দ্রীনের ক্ষেত্রে R_0 খুব বেশী পরিবর্ত্তিত হয় না, এর পরিমাণ সমস্ত ক্ষেত্রেই 1·2 থেকে 1·5 ফের্মির মধ্যে থাকে। $R_0 = 1\cdot4$ ফের্মি ধরলে আমরা 7·1 সূত্র প্রয়োগ ক'রে একটি কেন্দ্রীনের ব্যাসার্ধ নির্ণয় করতে পারি যার ভরসংখ্যা 50

$$R = (1\cdot4 \times 10^{-13}) \times 50^{\frac{1}{3}} = 5\cdot15 \text{ ফের্মি}$$

এইভাবে ইউরেনিয়াম কেন্দ্রীনের (ভরসংখ্যা 238) ব্যাসার্ধের জন্য আমরা পাই

$$R = 1\cdot4 \times 10^{-13} \times 238^{\frac{1}{3}} = 8\cdot67 \text{ ফের্মি}$$

এথেকে আমরা দেখি যে ভরসংখ্যার সাথে সাথে ব্যাসার্ধের বৃদ্ধি হয় অপেক্ষাকৃত শ্লথ, ভরসংখ্যা যেখানে চতুর্গুণেরও বেশী হয়েছে ব্যাসার্ধ হয়েছে সেখানে দেড়গুণের সামান্য বেশী। এটা অবশ্য খুবই স্বাভাবিক যেহেতু ব্যাসার্ধ ভরসংখ্যার ঘনমূলের সমানুপাতী।

আইসোটোপ (Isotope)

পরমাণুকেন্দ্রীন শুধু নিউট্রন ও প্রোটনের সমবায়ে গঠিত এই প্রকল্প থেকে স্বভাবতঃই মনে হয় যে এমন বহু কেন্দ্রীনের অস্তিত্ব থাকতে পারে যেগুলির প্রোটন সংখ্যা অভিন্ন কিন্তু নিউট্রন সংখ্যা পৃথক। এরকম বহু কেন্দ্রীনের অস্তিত্ব সত্যিই প্রকৃতির ভিতর লক্ষিত হয়। উদাহরণস্বরূপ, হাইড্রোজেন কেন্দ্রীনে প্রোটন সংখ্যা এক, কোন নিউট্রন নেই। ডিউটেরিয়াম এবং ট্রাইটিয়াম কেন্দ্রীনেও প্রোটন সংখ্যা এক কিন্তু নিউট্রন সংখ্যা এদের ভিতর যথাক্রমে এক ও দুই। একই প্রোটন সংখ্যা কিন্তু নিউট্রন সংখ্যা বিভিন্ন এই ধরণের কেন্দ্রীন সমন্বিত পরমাণুগুলিকে ঐ বিশেষ মৌলের আইসোটোপ আখ্যা দেওয়া হয়। প্রকৃতির ভিতর হাইড্রোজেনের উপরোক্তনামীয় দুটি আইসোটোপই দেখতে পাওয়া যায়, ডিউটেরিয়াম অক্সিজেনের সঙ্গে মিলিত হয়ে যে যৌগটি উৎপন্ন করে তাকেই বলা হয় ভারী জল, D_2O। একটি মৌলের রাসায়নিক বৈশিষ্ট্য শুধু এর কেন্দ্রীনের প্রোটন সংখ্যা দ্বারা নির্দ্ধারিত হয়, সুতরাং এর যাবতীয় আইসোটোপগুলির রাসায়নিক প্রকৃতিও অভিন্ন হবে। জগতে সমস্ত

মৌলেরই আইসোটোপ দেখা যায়। ইউরেনিয়ামের দুটি বিখ্যাত আইসোটোপ হ'ল U^{238} এবং U^{235}, এরা পারমাণবিক শক্তি উৎপাদনের কাজে ব্যবহৃত হয়। অনেক ক্ষেত্রেই একটি মৌলের এক বা একাধিক আইসোটোপ তেজস্ক্রিয় হতে দেখা যায়, অর্থাৎ এরা তেজস্ক্রিয় বিকিরণের ফলে ক্ষরিত হয়ে অন্য কেন্দ্রীনে রূপান্তরিত হয়। এখন থেকে বিভিন্ন পরমাণুকেন্দ্রীনের বিবরণ দেবার জন্য আমরা কতগুলি সূচক ব্যবহার করব যেগুলি পরবর্ত্তী অধ্যায়গুলিতে বারবার ব্যবহৃত হবে। কেন্দ্রীনের মোট প্রোটন সংখ্যা অর্থাৎ এর পারমাণবিক সংখ্যাকে বলা হয় Z এবং এর ভরসংখ্যা A, সুতরাং মোট নিউট্রন সংখ্যা $A-Z$। প্রতিটি কেন্দ্রীনকে এর ভরসংখ্যা, পারমাণবিক সংখ্যা এবং মৌল সূচকের দ্বারা নিম্নলিখিত উপায়ে চিহ্নিত করা হবে

$_Z(\text{মৌল সূচক})^A \rightarrow {}_{92}U^{238}, {}_{92}U^{235}, {}_{1}H^{2}, {}_{2}He^{3}, {}_{6}C^{12}$, ইত্যাদি।

পরমাণুর রাসায়নিক গুণাবলী শুধু Z-এর উপর নির্ভরশীল, সেখানে কেন্দ্রীনের ভরসংখ্যা বা নিউট্রন সংখ্যার জ্ঞান খুব বেশী প্রয়োজনীয় নয়। কিন্তু কেন্দ্রীনের প্রকৃতি বিশ্লেষণ করতে গেলে কিংবা কেন্দ্রীনঘটিত বিক্রিয়াগুলি সম্বন্ধে জানতে হলে প্রোটন সংখ্যা Z এবং নিউট্রন সংখ্যা $A-Z$ দুইই সমান তাৎপর্য্যপূর্ণ।

আইসোটোপের অস্তিত্ব সর্ব্বপ্রথম প্রমাণ করেন ফ্রেডেরিক সডি ও পরে জে. জে. টমসন। টমসন নিওনের পরমাণু নিয়ে পরীক্ষা করেছিলেন, এই পরীক্ষার কথা আমরা পূর্ব্বে সবিস্তারে বর্ণনা করেছি। নিওন কেন্দ্রীনে প্রোটনসংখ্যা 10 এবং টমসনের পরীক্ষায় নিওনের যে দুটি আইসোটোপের সন্ধান পাওয়া যায় তাদের ভরসংখ্যা যথাক্রমে 20 এবং 22। এই পরীক্ষায় প্রমাণিত হয়েছিল যে প্রকৃতিলব্ধ নিওনের ভিতর দুই পৃথক পারমাণবিক ওজন-বিশিষ্ট নিওনের অস্তিত্ব আছে। নিওনের পারমাণবিক ভর 20·18, তাথেকে কি অনুপাতে ঐ আইসোটোপ দুটি নিওন গ্যাসের ভিতর মিশে আছে তাও নির্ণয় করা যায়। নিওনের অবশ্য আরও একটি স্থায়ী আইসোটোপ আছে যার ভরসংখ্যা 21 (পরিশিষ্টের সারণী দ্রষ্টব্য) কিন্তু প্রকৃতিলব্ধ নিওনের ভিতর এর অনুপাত অত্যন্ত কম (0·25%) ব'লে টমসনের পরীক্ষায় এটি ধরা পড়েনি। অধিকাংশ মৌলেরই এরকম একাধিক স্থায়ী আইসোটোপ আছে। বিভিন্ন আইসোটোপগুলিকে বিভিন্ন অনুপাতে মিশে থাকতে দেখা যায়। সাধারণতঃ মৌলের পারমাণবিক ওজন নির্ণয় করা হয় রাসায়নিক পদ্ধতিতে, এজন্য এই ওজন হ'ল বিভিন্ন অনুপাতে মিশ্রিত আইসোটোপগুলির

গড় ওজন। বর্ত্তমানে কৃত্রিম উপায়ে পরীক্ষাগারে বহু নূতন নূতন আইসোটোপ উৎপাদন করা সম্ভব। মোট আবিষ্কৃত আইসোটোপের সংখ্যা এক হাজারেরও অধিক, তবে এদের অধিকাংশই তেজস্ক্রিয়। এখনও নূতন নূতন আইসোটোপ আবিষ্কৃত হচ্ছে। প্রকৃতির ভিতর বিভিন্ন স্থায়ী আইসোটোপের আপেক্ষিক প্রাচুর্য্যের তালিকা প্রস্তুত করা হয়েছে। অধিকাংশ মৌলের ক্ষেত্রেই কতগুলি বিশেষ বিশেষ আইসোটোপের অত্যধিক প্রাচুর্য্য লক্ষ্য করা যায়, যেমন দেখা যায় ${}_3L^7$ এবং ${}_6C^{12}$ আইসোটোপদ্বয়ের ক্ষেত্রে, প্রাকৃতিক লিথিয়ামে এবং কার্ব্বনে এই আইসোটোপদ্বয়ের প্রাচুর্য্য যথাক্রমে 92·6% এবং 98·9%। প্রকৃতির মধ্যে কোন আইসোটোপের কত প্রাচুর্য্য হয় এবং কেন হয় সেসব প্রশ্ন খুবই কৌতূহলোদ্দীপক, যদিও এদের সঠিক সমাধান পাওয়া দুষ্কর। আইসোটোপ আবিষ্কারের আগে পারমাণবিক ওজনের যেসব তালিকা তৈরী হয়েছে সবগুলিতেই আমরা শুধু বিভিন্ন স্থায়ী আইসোটোপের ওজনের একটা গড় পাই। রসায়নবিদেরা এখনও অনেক ক্ষেত্রে এই পদ্ধতি অনুসরণ করেন, তাঁরা যে মানক ব্যবহার করেন তাতে প্রকৃতিজাত অক্সিজেনের ওজন 16 ধরা হয়। তবে পূর্ব্বেই বলা হয়েছে যে পদার্থবিদ্যার পারমাণবিক ওজনের মানক হ'ল O^{16} আইসোটোপের ওজন, এর আপেক্ষিক ভর ধরা হয় 16·0000। ইদানীং ${}_6C^{12} = 12·0000$ মানকটি ব্যবহৃত হয়।

ডিউটেরন (Deuteron)

ডিউটেরিয়াম (D) হ'ল হাইড্রোজেনের একটি আইসোটোপ এবং যাবতীয় আইসোটোপগুলির মধ্যে এটি সর্ব্বাপেক্ষা সরল। একটি নিউট্রন এবং একটি প্রোটন পরস্পরের আকর্ষণী বলের প্রভাবে আবদ্ধ হয়ে একটি ডিউটেরিয়াম কেন্দ্রীনের সৃষ্টি করে, এই কেন্দ্রীনকে বলা হয় ডিউটেরন (d)। হাইড্রোজেন যেরকম সরলতম পরমাণু, তেমনিই হ'ল কেন্দ্রীনগুলির ভিতর ডিউটেরনের স্থান। এই কারণে ডিউটেরনের ধর্ম্মাবলীর মধ্যে কেন্দ্রীনের বলসমূহের প্রকৃতি অনুধাবন করার সুযোগ খুব বেশী। নিউট্রন, হাইড্রোজেন ও ডিউটেরিয়ামের ভরের তুলনা করে ডিউটেরনের বন্ধনশক্তি নির্ণয় করা যায়।

$$\text{বন্ধনশক্তি} = M_n + M_H - M_D = (1·008983 + 1·008143 - 2·014736) \text{ এএমইউ}$$

$$= 0·002390 \text{ এএমইউ} = 2·225 \text{ এমইভি}$$

অন্যান্য পরীক্ষার দ্বারাও বন্ধনশক্তির পরিমাণ মাপা সম্ভব, শক্তিশালী রঞ্জনরশ্মির প্রভাবে নিম্নলিখিত বিক্রিয়া ঘটতে পারে

$$h\nu + d \rightarrow n + p$$

দেখা গেছে যে 2·225 এমইভির কম শক্তিসম্পন্ন রঞ্জনরশ্মি আলোককণার দ্বারা এই বিক্রিয়া ঘটতে পারে না। এত অধিক শক্তিসম্পন্ন রঞ্জনরশ্মি সাধারণতঃ কেন্দ্রীনের বিকিরণ থেকে উৎপন্ন হয়, এদের বলা হয় গামারশ্মি। নিম্নলিখিত বিপরীত বিক্রিয়াটিও লক্ষ্য করা যায়

$$n + p \rightarrow d + h\nu$$

যেসব নিউট্রনগুলি খুবই শ্লথ অর্থাৎ গতিশক্তি খুব কম সেগুলি হাইড্রোজেনের ভিতর শোষিত হলে এই বিক্রিয়াটি ঘটবে। এই বিক্রিয়াটি সহজেই লক্ষ্য করা যায়, এর ফলে যে গামা কোয়াণ্টাম উৎপন্ন হয় তার শক্তি 2·225 এমইভি। উপরোক্ত বিক্রিয়াদ্বয়ের সাহায্যে ডিউটেরনের বন্ধনশক্তি নির্ভুলভাবে মাপা সম্ভব হয়েছে।

ডিউটেরনের ঘূর্ণির পরিমাণ $1\hbar$, নিউট্রন ও প্রোটন $l=0$ স্তরে থাকে এবং এদের ঘূর্ণিদ্বয় একই দিকে থাকে। যেহেতু ঘূর্ণিদ্বয় একই দিকে বরাবর থাকে এবং কক্ষীয় কৌণিক ভরবেগ শূন্য, আশা করা যায় যে ডিউটেরনের চৌম্বক ভ্রামক হবে নিউট্রন ও প্রোটনের ভ্রামকদ্বয়ের যোগফলের সমান, $2{\cdot}79 - 1{\cdot}91 = 0{\cdot}88\ \mu_N$। কিন্তু ডিউটেরন চৌম্বক ভ্রামকের পরীক্ষালব্ধ মান হ'ল

$$\mu_d = 0{\cdot}85\ \mu_N$$

প্রভেদ অবশ্য সামান্যই কিন্তু তা হলেও পরীক্ষার দ্বারা তা মাপা সম্ভব। এই প্রভেদ ব্যাখ্যা করা যায় যদি আমরা ধ'রে নিই যে ডিউটেরনের ভিতর নিউট্রন ও প্রোটন আংশিকভাবে $l=0$ ও আংশিকভাবে $l=2$ স্তরে অবস্থান করে। $l=0$ স্তরে অবস্থানের অনুপাত অপেক্ষাকৃত অনেক বেশী, কিন্তু $l=2$ স্তরের যদি সামান্যও মিশ্রণ থাকে তবে ঐ স্তরে কক্ষীয় কৌণিক ভরবেগ থাকার দরুণ স্বতন্ত্র চৌম্বক ভ্রামক সৃষ্টি হবে। এইভাবে বিচার করলে চৌম্বক ভ্রামকের উপরিলিখিত তারতম্য বিশ্লেষণ করা যায়। কোয়াণ্টাম বলবিজ্ঞানের সাহায্যে দেখান যায় যে এক বিশেষ ধরণের কেন্দ্রীনের বল আছে যার উপস্থিতিতে এইভাবে বিভিন্ন স্তরের মিশ্রণ সম্ভব হয়। কোয়াণ্টাম তত্ত্বের সাহায্যে আরও প্রমাণ করা যায় যে ডিউটেরনের ভিতর $l=0$ এবং $l=1$ স্তরদ্বয়ের মিশ্রণ সম্ভব নয়।

আইসোটোপ পৃথকীকরণ

আইসোটোপ পৃথকীকরণ একটি জটিল সমস্যা, এতে অত্যন্ত উন্নত ধরণের কারিগরী পদ্ধতির প্রয়োগের প্রয়োজন হয়। এই পরিচ্ছেদে আমরা খুব সংক্ষেপে আইসোটোপ পৃথকীকরণের দুই একটি পদ্ধতির মূল নীতিগুলি আলোচনা করব। প্রকৃতিজাত পদার্থের ভিতর বিভিন্ন আইসোটোপগুলি সাধারণতঃ ধ্রুব অনুপাতে মিশ্রিত থাকে, যেমন জল যেকোন জায়গা থেকেই সংগৃহীত হউক না কেন, এতে সাধারণ জল এবং ভারী জলের (D_2O) অনুপাত সব সময়ই ধ্রুব থাকবে। তবে এই নিয়মটি সম্পূর্ণ সার্বজনীন নয়, কখনও কখনও বিভিন্ন উৎস থেকে প্রাপ্ত মৌলগুলির ভিতর আইসোটোপের অনুপাতের সামান্য তারতম্য লক্ষ্য করা যায়। দেখা গেছে যে বিভিন্ন উৎস থেকে প্রাপ্ত কার্বনের দুটি আইসোটোপ $_6C^{12}$ এবং $_6C^{13}$ এর অনুপাতে অনেক সময় শতকরা 5 ভাগের তারতম্য থাকে। চুনাপাথরে যে কার্বন থাকে তার তুলনায় জীবদেহ থেকে প্রাপ্ত কার্বনে হাল্কা আইসোটোপটির সামান্য আধিক্য দেখা যায়।

আইসোটোপগুলির রাসায়নিক ধর্মাবলী অভিন্ন এজন্য বিশুদ্ধ রাসায়নিক পদ্ধতিতে এদের পৃথক করা যায় না। তবে আইসোটোপগুলির মধ্যে সামান্য ভরপার্থক্য থাকে এবং এই ভরপার্থক্যের উপর ভিত্তি ক'রে কতগুলি প্রক্রিয়া আছে যাদের প্রভাব বিভিন্ন আইসোটোপের উপর বিভিন্ন এবং এদের সহায়তায় আইসোটোপগুলি পৃথক করা সম্ভব। আইসোটোপ পৃথকীকরণের সবচেয়ে বহুলপ্রচলিত পদ্ধতি হ'ল গ্যাসের অভিব্যাপ্তি প্রক্রিয়া। দুই বিভিন্ন আণবিক ওজনবিশিষ্ট গ্যাসের মিশ্রণকে যদি একটি সুষির প্রতিবন্ধকের ভিতর দিয়ে অভিব্যাপ্ত হতে দেওয়া হয় তবে যে গ্যাসের অণুগুলি অপেক্ষাকৃত কম ভারী সেই গ্যাসটি অধিক পরিমাণে অভিব্যাপ্ত হবে। গ্যাসের অভিব্যাপ্তির সূত্রটি প্রথম অধ্যায়ে আলোচনা করা হয়েছে; অভিব্যাপ্তির হার R, গ্যাসের আণবিক ভরের বর্গমূলের ব্যস্ত অনুপাতী। দুটি গ্যাস যাদের আণবিক ওজন যথাক্রমে M_1 এবং M_2, এদের অভিব্যাপ্তির হারের অনুপাত হবে

$$A=\frac{R_{M_1}}{R_{M_2}}=\sqrt{\frac{M_2}{M_1}} \quad \cdots \quad 7{\cdot}2$$

যদি $M_1 < M_2$ হয় তবে $R_{M_1} > R_{M_2}$, অর্থাৎ হাল্কা গ্যাসটি অধিক পরিমাণে অভিব্যাপ্ত হবে। এই সূত্রটি যেমন বিভিন্ন আণবিক ওজনবিশিষ্ট গ্যাসের পক্ষে প্রযোজ্য তেমনি কোন একটি গ্যাসের বিভিন্ন আইসোটোপীয়

ভরবিশিষ্ট বিভিন্ন অণুগুলির অভিব্যাপ্তির ক্ষেত্রেও প্রযোজ্য। সুতরাং নিওনের দুটি আইসোটোপের ক্ষেত্রে অভিব্যাপ্তির হারের অনুপাত হবে

$$A=\sqrt{\frac{22}{20}}=1\cdot049$$

এই পরিমাণ একের খুবই নিকটবর্ত্তী, সুতরাং একবার কি দুইবার অভিব্যাপ্তির ফলে যে পৃথকীকরণ হবে তার পরিমাণ নগণ্য। তবে প্রতিবার অভিব্যাপ্তির ফলে অভিব্যাপ্ত গ্যাসের মধ্যে হাল্কা আইসোটোপটির অনুপাত বৃদ্ধি পাবে এবং এই পদ্ধতি ব্যবহার ক'রে বহুসংখ্যকবার অভিব্যাপ্তি ঘটিয়ে গ্যাসীয় অবস্থায় আইসোটোপগুলি পৃথক ক'রে ফেলা সম্ভব। আইসোটোপের মিশ্রণকে যদি n সংখ্যক চক্রে প্রতিবন্ধকের ভিতর দিয়ে চালিত করা হয় তবে nতম চক্রের পর মিশ্রণের অনুপাত দাঁড়াবে

$$A^{n}=\left(\frac{M_2}{M_1}\right)^{n/2}$$

সাফল্যজনকভাবে নিওন আইসোটোপ প্রথম পৃথক করতে সক্ষম হন হার্টজ, ইনি একটি বর্ত্তনীতে 48টি প্রতিবন্ধক সমন্বিত নল নিয়ে কাজ করেন এবং পাম্প ও ভালভের সাহায্যে ঐ নলগুলির মধ্যস্থ প্রতিবন্ধকের ভিতর দিয়ে নিওন গ্যাসকে চক্রাকারে বারবার চালিত করা হয়। এইভাবে আট ঘণ্টা চালানর পর অবশেষে বায়ুচাপে প্রায় 55 ঘন সেমি Ne^{20} গ্যাস পাওয়া যায় যার ভিতর Ne^{22} এর পরিমাণ শতকরা এক ভাগের কম থাকে। প্রতিবার অভিব্যাপ্তির পর গ্যাসের কিছুটা অংশ যা অভিব্যাপ্ত না হয়ে পড়ে থাকে তা সরিয়ে দিতে হয়, এজন্য শুরুতে বিপুল পরিমাণ গ্যাস নিয়ে আরম্ভ করলেও পরিশেষে বিশুদ্ধ আইসোটোপ সামান্য পরিমাণেই পাওয়া সম্ভব হয়।

আইসোটোপ পৃথকীকরণের সবচেয়ে কঠিন অধ্যায় হ'ল ইউরেনিয়াম আইসোটোপের পৃথকীকরণ। ইউরেনিয়ামের প্রধান দুটি আইসোটোপ U^{238} এবং U^{235}, প্রকৃতিলব্ধ ইউরেনিয়ামে এদের অনুপাত 140 : 1। ইউরেনিয়াম কঠিন পদার্থ এজন্য গ্যাসীয় অভিব্যাপ্তি পদ্ধতি ব্যবহার করতে হলে ইউরেনিয়ামকে কোন গ্যাসীয় যৌগের আকারে ব্যবহার করতে হবে। এরকম একটি যৌগ হ'ল ইউরেনিয়াম হেক্সাফ্লুরাইড, UF_6। দুই বিভিন্ন পারমাণবিক ওজনবিশিষ্ট ইউরেনিয়াম পরমাণুর অস্তিত্ব থাকায় এই যৌগের

অণুগুলির দুই বিভিন্ন আণবিক ওজন থাকবে এবং এই দুইপ্রকার অণুর অভিব্যাপ্তির হার এক্ষেত্রে (ফ্লোরিনের আইসোটোপটির পারমাণবিক ভর 19)

$$A=\sqrt{\frac{352}{349}}=1{\cdot}0043$$

A-এর এই পরিমাণ এবং প্রাকৃতিক ইউরেনিয়ামে U^{235} আইসোটোপের নগণ্য অনুপাত থেকে সহজেই প্রতীয়মান হয় যে U^{235}-এর সম্পূর্ণ পৃথকীকরণ করতে হলে অভিব্যাপ্তি প্রক্রিয়া বহুবার চালাতে হবে। দেখা যায় যে এ পদ্ধতিতে ইউরেনিয়াম আইসোটোপের উপযুক্ত পৃথকীকরণ করতে হলে 4000 থেকে 5000 সুষির প্রতিবন্ধক সমন্বিত নল ব্যবহার করার প্রয়োজন হয় এবং শতকরা 99 ভাগ বিশুদ্ধ U^{235} পেতে হলে পরিগ্রন্ত আয়তনের প্রায় 100,000 গুণ অধিক আয়তনের UF_6 গ্যাস নিয়ে শুরু করতে হয়। এই পদ্ধতিতে বহুসংখ্যক পাম্পের সাহায্যে বারবার গ্যাসকে সঙ্কুচিত করতে হয়। এই পাম্পগুলি চালু রাখতে বিপুল পরিমাণ বৈদ্যুতিক শক্তি ব্যয়িত হয় এবং প্রক্রিয়াটি এজন্য অত্যধিক ব্যয়সাধ্য। কিন্তু তা সত্ত্বেও ব্যাপক হারে ইউরেনিয়াম আইসোটোপ পৃথকীকরণের জন্য এটিই হ'ল সর্ব্বাধিক ব্যবহৃত পদ্ধতি।

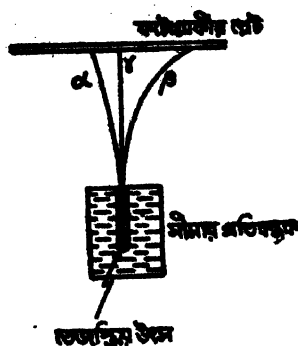
অভিব্যাপ্তি পদ্ধতি ছাড়া আরও নানারকম পদ্ধতিতে আইসোটোপ পৃথকীকরণ সম্ভব। ডিউটেরিয়ামের পৃথকীকরণ অপেক্ষাকৃত সহজ এজন্য ভারী জল অপেক্ষাকৃত সস্তায় উৎপন্ন করা যায়। অনেক শিল্পেই হাইড্রোজেন গ্যাসের প্রয়োজন হয় যা সচরাচর জলের তড়িৎ-বিশ্লেষণের সাহায্যে উৎপন্ন করা হয়। যেহেতু ডিউটেরিয়াম হাইড্রোজেনের দ্বিগুণ ভারী, এজন্য তড়িৎ-বিশ্লেষণের সময় ডিউটেরিয়াম আয়নগুলির গতিবেগ হাইড্রোজেনের তুলনায় অনেক কম হয়। এগুলি ক্রমশঃ পিছিয়ে পড়তে থাকে এবং ডিউটেরিয়ামের তুলনায় অতিরিক্ত হাইড্রোজেন ক্যাথোডের ভিতর দিয়ে নির্গত হতে থাকে। এর ফলে অবশিষ্ট জলে ডিউটেরিয়ামের অনুপাত ক্রমশঃ বৃদ্ধি পেতে থাকে। এই প্রক্রিয়াটি প্রথম প্রয়োগ করেন ইউরে (Urey)। এই পদ্ধতি প্রয়োগ ক'রে ইনি জলে হাইড্রোজেন-ডিউটেরিয়াম মিশ্রণের ভিতর ডিউটেরিয়ামের অনুপাত স্বাভাবিক পরিমাণের তুলনায় অনেক বেশী বর্দ্ধিত করতে সক্ষম হন।

আধুনিককালে ব্যবহারিক ভিত্তিতে ডিউটেরিয়াম উৎপাদনের জন্যও ঐ একই পদ্ধতির আশ্রয় নেওয়া হয়। সাধারণতঃ খুব লঘু সোডিয়াম বা পটাশিয়াম হাইড্রোক্সাইডের দ্রবণ নেওয়া হয় এবং এর তড়িৎ-বিশ্লেষণ করা হয়

যতক্ষণ পর্যন্ত না শতকরা 90 ভাগ জল নিঃশোষিত হয়ে যায়। অবশিষ্ট শতকরা দশভাগ দ্রবণ কার্বন ডাই-অক্সাইড ব্যবহার ক'রে নিরপেক্ষ করা হয়। এই অবশিষ্ট জলের ভিতর ডিউটেরিয়াম অক্সাইডের অনুপাত অনেক বেশী হয়। একে পাতিত ক'রে শুদ্ধ ক'রে নিয়ে তড়িৎ-বিশ্লেষণের পরবর্ত্তী ধাপে ব্যবহার করা হয়। পাঁচ থেকে ছয়টি ধাপের প্রয়োজন হয় এবং তারপর অত্যধিক শুদ্ধীকৃত ডিউটেরিয়াম পাওয়া যায়। এইভাবে 99·9% শুদ্ধ ভারী জল উৎপন্ন করা সম্ভব এবং এর সঙ্গে তুলনীয় প্রাথমিক ভারী জলের অনুপাত বা প্রাকৃতিক জলে মাত্র 0·014%। এই প্রক্রিয়ায় বিদ্যুতের খরচ হয় অত্যধিক, তিরিশ হাজার এ্যাম্পিয়ার ঘণ্টা বিদ্যুৎ খরচ ক'রে এক গ্রাম ভারী জল তৈরী করা যায়। যদি শতকরা 99 ভাগ শুদ্ধীকরণ প্রয়োজন হয় তবে প্রাথমিক জলের আয়তন কমে গিয়ে এর 0·001% হয়ে যেতে হবে। এই কারণে ভারী জল সেইসব স্থানেই উৎপন্ন করা সহজ যেসব জায়গায় প্রচুর পরিমাণে সস্তা জলবিদ্যুৎ পাওয়া যায়, যেমন নরওয়েতে। তড়িৎ-বিশ্লেষণের দ্বারা ভারতবর্ষেও আজকাল বিপুল পরিমাণে ভারী জল উৎপন্ন করা সম্ভব হচ্ছে। বৈদ্যুতিক-বিশ্লেষণ পদ্ধতি শুধু হাইড্রোজেনের আইসোটোপ উৎপাদনের ক্ষেত্রেই লাভজনকভাবে প্রয়োগ করা যায় তার কারণ আইসোটোপ-দ্বয়ের মধ্যে এক্ষেত্রে ভরের পার্থক্য অনেক বেশী, একটি আরেকটির প্রায় দ্বিগুণ ভারী।

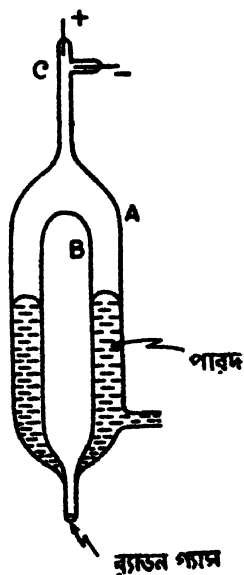
তেজস্ক্রিয়তা (Radio-activity)

এতক্ষণ পর্য্যন্ত আমরা কেন্দ্রীনের স্থাবর ধর্ম্মাবলী সম্বন্ধে আলোচনা করেছি। কিছু কিছু কেন্দ্রীনের ভিতর সবসময়ই আপনাথেকেই কতগুলি কেন্দ্রীনঘটিত প্রক্রিয়া ঘটতে দেখা যায় যেগুলিকে একত্রে তেজস্ক্রিয়তা আখ্যা দেওয়া হয়। সংক্ষেপে তেজস্ক্রিয়তা বলতে বোঝায় বিকিরণধর্ম্মী কতগুলি প্রক্রিয়া যেখানে কেন্দ্রীনের ভিতর থেকে স্বতোৎসারিতভাবে কতগুলি শক্তিশালী কণা বা উচ্চস্পন্দনাঙ্কবিশিষ্ট বিদ্যুৎচুম্বকীয় বিকিরণ বেরিয়ে আসতে থাকে। তেজস্ক্রিয়তা প্রথম আবিষ্কার করেন ফরাসী বিজ্ঞানী বেকরেল (Becquerel)। ইউরেনিয়াম নিয়ে পরীক্ষা করার সময় তিনি দেখতে পান যে ইউরেনিয়াম বা ইউরেনিয়ামের কিছু যৌগ একটি ফোটোগ্রাফীর পাতে মুড়ে রাখলে পাতটি কালো হয়ে যায়। এই পর্য্যবেক্ষণ থেকে বেকরেল সিদ্ধান্ত করলেন যে ইউরেনিয়ামের ভিতর থেকে একধরণের বিকিরণ সবসময়ই বেরিয়ে আসছে যা ফোটোগ্রাফীর পাতকে কালো ক'রে ফেলতে পারে। পরে দেখা গেল যে ইউরেনিয়াম থেকে বিকিরিত রশ্মিগুলিকে চৌম্বকক্ষেত্রের প্রভাবে

বাঁকিয়ে ফেলা যায়। এথেকে প্রমাণ হয় যে এই বিকিরণগুলির ভিতর আহিত কণার অস্তিত্ব আছে। 7·1 চিত্রে কণাগুলি চৌম্বকক্ষেত্রে কিভাবে

চিত্র 7·1 : চৌম্বকক্ষেত্রের প্রভাবে আলফা ও বিটা রশ্মির বিচ্যুতি।

বাঁকে তা দেখান হয়েছে, এখানে চৌম্বকক্ষেত্রটি পৃষ্ঠার সমতলের সঙ্গে লম্বভাবে আছে। দেখা যায় যে কিছু কণা ডানদিকে এবং কিছু বাঁদিকে বেঁকে যাচ্ছে, আবার কিছু কিছু বিকিরণ আদৌ না বেঁকে সোজাসুজি চলে যাচ্ছে। যেহেতু কণাগুলি চৌম্বকক্ষেত্রের উভয়দিকেই বাঁকছে, এথেকে বোঝা যায় তেজস্ক্রিয় বিকিরণের মধ্যে ধন ও ঋণ উভয়বিধ আধানবিশিষ্ট কণারই অস্তিত্ব আছে। এছাড়া আরও একপ্রকারের বিকিরণ নির্গত হয় যা চৌম্বকক্ষেত্রের প্রভাবে বেঁকে যায় না, এই বিকিরণগুলির অন্তর্গমন ক্ষমতাও খুব বেশী, পরীক্ষায় দেখা গেছে যে এরা যথেষ্ট পুরু সীসার পাতের ভিতর দিয়ে চলে যেতে পারে। পরবর্তী কালে প্রমাণিত হয়েছে যে ঐ বিকিরণগুলি অত্যধিক স্পন্দনাঙ্কবিশিষ্ট রঞ্জনরশ্মি ভিন্ন আর কিছুই নয়, এরাই গামারশ্মি নামে অভিহিত হয়ে থাকে। ধন ও ঋণ আধানবিশিষ্ট কণাগুলিকে যথাক্রমে আলফা ও বিটা কণা নামে অভিহিত করা হয়। এখন থেকে আমরা তেজস্ক্রিয় বিকিরণগুলিকে এইসব নামগুলির দ্বারাই অভিহিত করব। মুক্ত অথবা অন্য কোন পরমাণুর সঙ্গে রাসায়নিক বন্ধনে আবদ্ধ, যেকোন অবস্থাতেই এবং সবসময়ই ইউরেনিয়াম পরমাণু থেকে তেজস্ক্রিয় বিকিরণ নির্গত হয়ে আসছে। তীব্র উত্তাপ, তীব্র চৌম্বকক্ষেত্র বা বৈদ্যুতিক ক্ষেত্র, প্রচণ্ড চাপ প্রভৃতি যেসব উপায়ে পরমাণুর ধর্মাবলী প্রভাবিত করা যায় সেগুলি তেজস্ক্রিয়তার প্রক্রিয়াকে প্রভাবিত করতে পারে না। সুতরাং বোঝা যায় যে সবরকম তেজস্ক্রিয় বিকিরণই কেন্দ্রীনের ভিতর থেকেই ঘটে থাকে, কারণ উপরোক্ত প্রক্রিয়াগুলির কেন্দ্রীনের উপর কোন প্রভাব নেই।

নির্গত কণাগুলির সত্যিকারের পরিচয় জানার জন্য তাদের আধান ও ভরের পরিমাণ জানা দরকার। টমসন যে উপায়ে ইলেকট্রনের e/m অনুপাত মেপেছিলেন সেই একই প্রক্রিয়া অবলম্বন ক'রে তেজষ্ক্রিয় বিকিরণজাত ঋণআহিত বিটাকণাগুলির আধান ও ভরের অনুপাত মাপা হয়েছে এবং তাথেকে প্রমাণিত হয়েছে যে ঐ কণাগুলি ইলেকট্রন ছাড়া আর কিছুই নয়। আলফাকণাগুলি বিটাকণাদের তুলনায় অনেক বেশী ভারী, এদের আধান এবং ভর ভরমাপনী পদ্ধতিতে মাপা সম্ভব এবং প্রমাণিত হয়েছে যে এগুলি আসলে হিলিয়ামের কেন্দ্রীন, $_2He^4$। এর আগে 'রাদারফোর্ড বিচ্ছুরণের' আলোচনা করার সময় আমরা আলফাকণাগুলির কিছু বর্ণনা দিয়েছি।

আলফাকণাগুলি যে হিলিয়াম কেন্দ্রীন ভিন্ন আর কিছুই নয় তা অন্য ধরণের পরীক্ষাতেও প্রমাণ করা যায়। দেখা গেছে যে প্রকৃতিজাত ইউরেনিয়াম খনিজকে উত্তপ্ত করলে তাথেকে হিলিয়াম গ্যাস বেরিয়ে আসে। এর কারণ ইউরেনিয়াম ও অন্যান্য তেজষ্ক্রিয় পরমাণুর ক্ষরণজাত আলফাকণাগুলি খনিজের ভিতর আটকে যায় এবং দুটি ইলেকট্রন কক্ষে আবদ্ধ ক'রে হিলিয়াম পরমাণুতে পরিণত হয়। রাদারফোর্ড একটি প্রত্যক্ষ পরীক্ষার দ্বারা আলফাকণা ও হিলিয়াম কেন্দ্রীনের অভিন্নতা প্রমাণ করেন, এই পরীক্ষার আয়োজনটি 7·2 চিত্রে দেখান হয়েছে। প্রধান উপকরণ হ'ল একটি কাঁচের নল A যার ভিতর অপর একটি মুখবন্ধ নল B আটকান আছে, A এবং B নলদ্বয় পরস্পর বায়ুসংযোগ বিবর্জিত। B নলটির একপ্রান্ত একটি সরু নলে পরিণত হয়েছে যার ভিতর দিয়ে তেজষ্ক্রিয়

চিত্র 7·2 : আলফাকণাগুলির স্বরূপ নির্ণয়ের জন্য রাদারফোর্ডের পরীক্ষা।

র‍্যাডন গ্যাস প্রবেশ করিয়ে দেওয়া যায়। র‍্যাডন গ্যাস সম্বন্ধে পঞ্চম অধ্যায়ে আমরা আলোচনা করেছি, এটি পর্য্যায়সারণীর অষ্টম-বিভাগে সর্ব্বশেষ মৌল হিসাবে আবির্ভূত হয় অর্থাৎ এটি একটি নিষ্ক্রিয় গ্যাস। তবে র‍্যাডন কেন্দ্রীন তেজষ্ক্রিয়, এটি আলফাকণা ক্ষরণ করে। B নলটি খুব পাতলা কাঁচে গঠিত যার জন্য ক্ষরিত আলফাকণা B-এর দেওয়াল

ভেদ ক'রে বাইরে বেরিয়ে আসতে পারে কিন্তু A-এর দেওয়াল ভেদ করতে পারে না, তখন এরা A নলের ভিতর হিলিয়াম গ্যাস হিসাবে সংগৃহীত হয়। A-কে প্রথমাবস্থায় বায়ুশূন্য ক'রে রাখা হয় এবং B-এর ভিতর র‍্যাডন গ্যাস প্রবেশ করিয়ে দেওয়া হয়; কিছু সময় এভাবে থাকার পর A-এর ভিতর যথেষ্ট পরিমাণে গ্যাস জমে ওঠে এবং পারদের উত্তোলনের দ্বারা তখন C নলের ভিতর এই গ্যাস উচ্চচাপে সংগ্রহ করা হয়। C নলটির মধ্যে দুটি বিদ্যুৎধারক যুক্ত থাকে যাদের সাহায্যে বিদ্যুৎমোক্ষণ ঘটিয়ে ঐ গ্যাসের বর্ণালী উৎপন্ন করা যায়। এইভাবে উৎপন্ন বর্ণালী প্রকৃতিজাত হিলিয়ামের বর্ণালীর সঙ্গে তুলনা ক'রে বোঝা যায় যে এই বর্ণালী সৃষ্টিকারী গ্যাস হ'ল আসলে হিলিয়াম। B নলের ভিতর হিলিয়াম গ্যাস প্রবেশ করিয়ে দেখা গেছে যে তা নলের দেওয়াল ভেদ ক'রে বাইরে বেরিয়ে আসতে পারে না, সুতরাং সংগৃহীত গ্যাস যে শুধু আলফাক্ষরণের দ্বারাই সৃষ্টি হয় সেসম্বন্ধে নিঃসন্দেহ হওয়া যায়।

তেজস্ক্রিয় বিকিরণের ধর্ম্ম

তেজস্ক্রিয় বিকিরণ আবিষ্কৃত হবার পর এদের ধর্ম্মাবলী সম্বন্ধে বহু পরীক্ষা করা হয়েছে, এদের প্রকৃতি সম্বন্ধে নিম্নলিখিত মন্তব্যগুলি করা যেতে পারে। প্রথমতঃ, রঞ্জনরশ্মির মত তেজস্ক্রিয় বিকিরণগুলিও পদার্থের ভিতর অন্তর্গমন করতে পারে। সর্ব্বাধিক অন্তর্গমন করে গামারশ্মি, তারপর যথাক্রমে বিটা ও আলফা কণাগুলি। একটি শক্তিশালী আহিতকণা কোন পদার্থের ভিতর যতদূর অন্তর্গমন করতে পারে সেই দূরত্বকে ঐ কণার দৌড়দূরত্ব বলা হয়, দৌড়দূরত্ব কণাটির গতিশক্তি, আধান এবং ভরের উপর নির্ভরশীল। বিটা-কণাগুলি যথেষ্ট শক্তিসম্পন্ন হলে কয়েক সেণ্টিমিটার পুরু এ্যালুমিনিয়ামের ফলক অতিক্রম ক'রে যেতে পারে। আলফাকণাগুলি সাধারণতঃ বাতাসের ভিতর মাত্র কয়েক সেণ্টিমিটার অগ্রসর হতে পারে।

প্রত্যেক প্রকার তেজস্ক্রিয় বিকিরণই আয়নীভবন ঘটাতে সক্ষম অর্থাৎ পদার্থের ভিতর দিয়ে যাবার সময় এরা পরমাণুর ভিতর থেকে ইলেকট্রন উৎখাত করতে পারে। একটি শক্তিশালী তেজস্ক্রিয় বিকিরণজাত কণা বহুসংখ্যক পরমাণুকে আয়নে পরিণত করতে সক্ষম, আয়নীভবনের দ্বারা ক্রমাগত শক্তিক্ষয় ঘটতে থাকে ব'লেই শক্তিশালী আহিত কণাগুলি পদার্থের ভিতর দিয়ে খুব বেশীদূর অগ্রসর হতে পারে না। পদার্থের অভ্যন্তরে গামারশ্মির কোন নির্দিষ্ট রূপ দৌড়দূরত্ব নেই, তবে শোষণের ফলে দূরত্বের সাথে সাথে এর তীব্রতা ক্রমশঃ

হ্রাস পেতে থাকে এবং কোন কোন নির্দ্দিষ্ট দূরত্বের পর তীব্রতা 50%, 10% অথবা 1%, ইত্যাদি হয়ে পড়বে তা গণনা ক'রে বলা যায়। গামারশ্মি আলোকবিদ্যুৎ প্রক্রিয়ার দ্বারা আয়নীভবন ঘটিয়ে থাকে, তাছাড়া কম্পটন এবং জোড়া সৃষ্টি প্রক্রিয়ারও জন্ম দিতে পারে। বিটা ও আলফা কণাগুলি পরমাণুর সঙ্গে সংঘর্ষের দ্বারা আয়নীভবন ঘটায়, আলফাকণার আয়নীকরণ ক্ষমতা অপেক্ষাকৃত অনেক বেশী।

তেজষ্ক্রিয় বিকিরণ অবদ্রবের সঙ্গে ক্রিয়া ক'রে ফোটোগ্রাফীর প্লেটকে কালো ক'রে ফেলতে পারে এবং কোন কোন পদার্থের উপর আপতিত হয়ে জ্যোতির্বিন্দু বা চমকের সৃষ্টি করতে পারে।

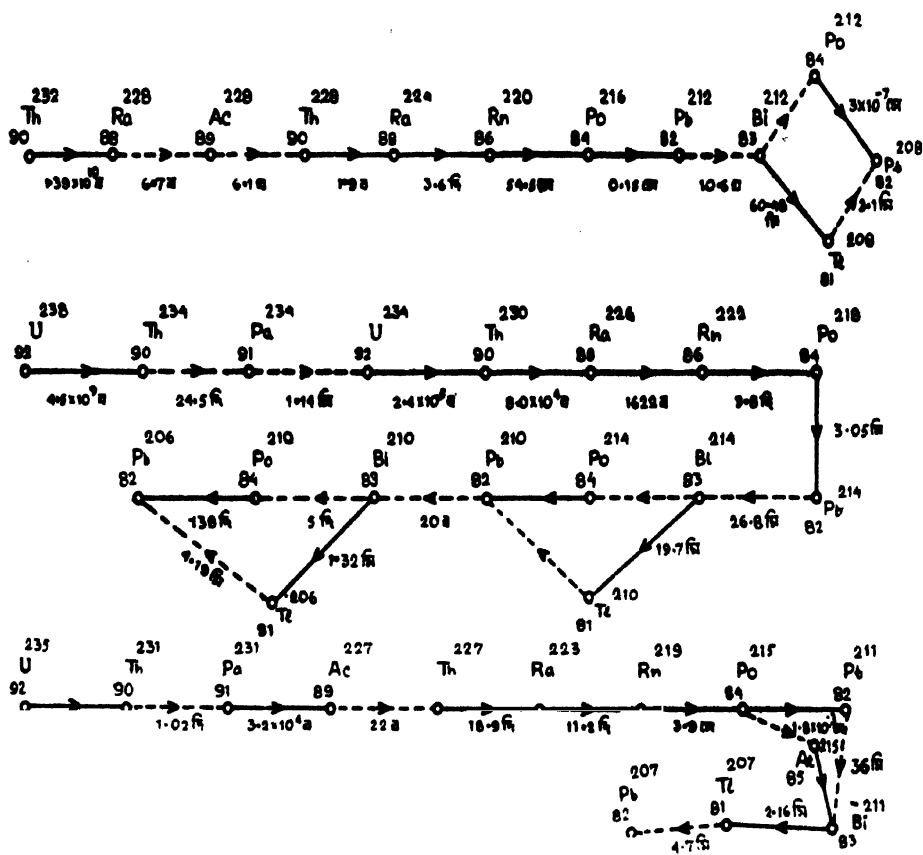
একথা প্রায় সর্ব্বজনবিদিত যে তেজষ্ক্রিয় বিকিরণ মানুষের শরীরের পক্ষে অত্যন্ত ক্ষতিকর, কি হিসাবে ক্ষতিকর তা অবশ্য উপরোক্ত ধর্ম্মগুলি অনুধাবন করলে সহজেই বোঝা যায়। এই বিকিরণগুলি যেহেতু তীব্র অন্তর্গমনক্ষম, এরা সহজেই শরীরের অভ্যন্তরে প্রবেশ ক'রে তীব্র আয়নীভবনের দ্বারা জীবকোষগুলিকে ধ্বংস করে ফ্যালে। তেজষ্ক্রিয় বিকিরণের হাত থেকে রক্ষা পাবার জন্য সাধারণতঃ বিকিরণশীল পদার্থের চারপাশে সীসার পাতের প্রতিবন্ধক রাখা হয়। অপেক্ষাকৃত সরু সীসার পাত অধিকাংশ তেজষ্ক্রিয় বিকিরণকেই সম্পূর্ণ শোষণ করতে সক্ষম।

তেজষ্ক্রিয় বিকিরণের উপরোক্ত ধর্ম্মগুলির সাহায্য নিয়ে এমন যন্ত্র নির্ম্মাণ করা হয়েছে যাদের সাহায্যে বিকিরণের অস্তিত্ব ও কণাদের শক্তি নির্দ্ধারণ করা সম্ভব। পরবর্ত্তী অধ্যায়ে আমরা এইরকম কতগুলি যন্ত্র সম্বন্ধে আলোচনা করব। বিভিন্ন যন্ত্রের সাহায্যে বিকিরণজাত প্রত্যেকটি কণাকে পৃথক পৃথক ভাবে পরীক্ষা করা ও গণনা করা সম্ভব। এখন থেকে পরমাণুর আলফা, বিটা ও গামা তেজষ্ক্রিয় বিকিরণধর্ম্মকে আমরা পরমাণুর তেজষ্ক্রিয় ক্ষরণ আখ্যা দেব। নির্দ্দিষ্ট পরিমাণ পদার্থ থেকে কি হারে বিকিরণ নির্গত হয়ে আসে তা অনুধাবন ক'রে বিজ্ঞানীরা তেজষ্ক্রিয় ক্ষরণের একটি সূত্র আবিষ্কার করেছেন। একথা মনে রাখতে হবে যে, যদিও ইউরেনিয়ামের তেজষ্ক্রিয় ক্ষরণের ভিতর আলফা, বিটা এবং গামা এই তিনপ্রকারের তেজষ্ক্রিয়তাই দৃষ্ট হয় কিন্তু একটি পরমাণু থেকে একসঙ্গে একই সময়ে এই তিনরকম ক্ষরণ ঘটে না। একটি পরমাণু থেকে একবারে একটি বিশেষ ধরণের ক্ষরণই ঘটতে পারে অর্থাৎ হয় আলফা নতুবা বিটা কিংবা গামাক্ষরণ। একবার ক্ষরণ ঘটার পর ক্ষরণোত্তর কেন্দ্রীনটি উত্তেজিত অবস্থায় থাকে, তখন এর ভিতর থেকে পুনরায় একধরণের ক্ষরণ ঘটতে পারে,

এবং এইভাবে চলতে থাকে। আলফা ও বিটাক্ষরণের দ্বারা কেন্দ্রীনের মোট আধানের পরিবর্তন হয়, এর ফলে কেন্দ্রীনটি একটি নূতন পারমাণবিক সংখ্যা প্রাপ্ত হয়, এইভাবে তেজষ্ক্রিয় বিকিরণের ফলে নূতন নূতন পরমাণুর সৃষ্টি হয় যাদের রাসায়নিক প্রকৃতি জনক কেন্দ্রীনের রাসায়নিক প্রকৃতি থেকে সম্পূর্ণ পৃথক। আলফাক্ষরণের ফলে Z পারমাণবিক সংখ্যাবিশিষ্ট কেন্দ্রীনটি $Z-2$ পারমাণবিক সংখ্যাবিশিষ্ট কেন্দ্রীনে রূপান্তরিত হয় এবং কেন্দ্রীনের ভরসংখ্যাও সেই সঙ্গে চার কমে যায়। পারমাণবিক সংখ্যা Z বিটাক্ষরণের ফলে $Z+1$-এ রূপান্তরিত হয়, ভরসংখ্যার এক্ষেত্রে কোন পরিবর্তন হয় না। গামাক্ষরণ সচরাচর আলফা ও বিটাক্ষরণোত্তর উত্তেজিত কেন্দ্রীন থেকে ঘটে থাকে, গামাক্ষরণের দ্বারা A বা Z-এর কোন পরিবর্তন হয় না। তেজষ্ক্রিয় বিকিরণের ফলে যে একটি মৌল অপর একটি মৌলে রূপান্তরিত হয় এই ঘটনাটি ড্যালটনের পরমাণুর অবিভাজ্যতা তত্ত্বের পরিপন্থী। পরে আমরা দেখতে পাব যে তেজষ্ক্রিয় ক্ষরণ ছাড়াও অন্যান্য পদ্ধতিতে, বিশেষ ক'রে কোন শক্তিশালী কণা যেমন আলফাকণা অথবা প্রোটন কিংবা নিউট্রনের আঘাতে বিক্রিয়া ঘটিয়ে একটি কেন্দ্রীনকে অপর একটি কেন্দ্রীনে রূপান্তরিত করা যায়। সুতরাং পরমাণুর অবিভাজ্যতার প্রকল্প কেন্দ্রীন-বিজ্ঞানে অন্ততঃ আর সত্য নয়।

প্রকৃতিলব্ধ তেজষ্ক্রিয় পদার্থের ক্ষরণ

প্রকৃতির ভিতর যেসব তেজষ্ক্রিয় আইসোটোপ দেখতে পাওয়া যায় তাদের কিছু তালিকা নিম্নে দেওয়া হয়েছে, এদের মধ্যে তিনটি আইসোটোপই মুখ্য, অন্যান্য আইসোটোপগুলি এদের ক্ষরণের দ্বারা সৃষ্টি হয়। এই তিনটি আইসোটোপ হ'ল U^{238}, U^{235} এবং Th^{232}, এরা প্রত্যেকেই আলফাকণা বিকিরণ ক'রে ক্ষরিত হয়। যে সময়ের মধ্যে নির্দিষ্ট পরিমাণে তেজষ্ক্রিয় পদার্থ ক্ষরিত হয়ে অর্দ্ধেকে পরিণত হয় সেই সময়কালকে বলা হয় উক্ত পদার্থের অর্দ্ধজীবনকাল, কোন কোন তেজষ্ক্রিয় পদার্থের অর্দ্ধজীবনকাল কয়েকশ' কোটি বছর হতে পারে, কোন কোনটির অর্দ্ধজীবনকাল কয়েকদিন বা কয়েক মিনিট এবং কোন কোনটির এক সেকেণ্ডের সামান্য ভগ্নাংশ মাত্র। উপরিলিখিত তিনটি কেন্দ্রীনের ক্ষেত্রে প্রত্যেকেরই অর্দ্ধজীবনকাল 10^{8} বছরেরও বেশী। অর্দ্ধজীবনকাল পরিমাপ করার বিভিন্ন পদ্ধতি আছে, সেগুলি সম্বন্ধে একটু পরেই আলোচনা করা হবে।

U^{238}, U^{235} এবং Th^{232}, এরা প্রত্যেকেই এক একটি স্বতন্ত্র তেজষ্ক্রিয় শ্রেণী তৈরি করে অর্থাৎ আলফাক্ষরণের ফলে এই কেন্দ্রীনগুলি

চিত্র 7·3

থোরিয়াম ($4n$), ইউরেনিয়াম ($4n+2$) এবং এ্যাক্টিনিয়াম ($4n+3$) শ্রেণীগুলিতে ধাপে ধাপে তেজস্ক্রিয় ক্ষরণ।

থেকে যে নূতন কেন্দ্রীনের সৃষ্টি হয় সেগুলিও তেজস্ক্রিয়, এই কেন্দ্রীনগুলি পুনরায় আলফা বা বিটাক্ষরণের দ্বারা অপর কোন কেন্দ্রীনে রূপান্তরিত হয় এবং এইভাবে চলতে থাকে যতক্ষণ পর্য্যন্ত না এমন একটি কেন্দ্রীনে এসে উপস্থিত হওয়া যায় যেটি সম্পূর্ণ স্থায়ী, অর্থাৎ এটির আর কোন তেজস্ক্রিয় ক্ষরণ নেই। এইভাবে একের পর এক নূতন নূতন তেজস্ক্রিয় আইসোটোপের আবির্ভাবকে বলা হয় তেজস্ক্রিয় শ্রেণী। পারমাণবিক সংখ্যা 84 থেকে আরম্ভ ক'রে 92 পর্য্যন্ত মৌলগুলির সমস্ত আইসোটোপই তেজস্ক্রিয়। উপরোক্ত তিনটি আইসোটোপের ক্ষেত্রেই দেখা যায় যে তেজস্ক্রিয় শ্রেণী সীসার কোন না কোন আইসোটোপে এসে শেষ হয়। এই তিনটি শ্রেণীর নাম যথাক্রমে ইউরেনিয়াম শ্রেণী, এ্যাক্টিনিয়াম শ্রেণী এবং থোরিয়াম শ্রেণী, 7·3 চিত্রে এই শ্রেণীগুলির তেজস্ক্রিয় ক্ষরণের বিবরণ দেওয়া হয়েছে।

এই তালিকাত্রয়ে অভগ্ন রেখাগুলি আলফাক্ষরণ এবং ভগ্নরেখাগুলি বিটাক্ষরণ নির্দেশ করে, সাথে সাথে অনেক ক্ষেত্রে ক্ষরণের অর্দ্ধজীবনকালও নির্দেশ করা হয়েছে। লক্ষণীয় যে U^{238} এবং Th^{232} আইসোটোপদ্বয়ের ভরসংখ্যা যুগ্ম হবার দরুণ ইউরেনিয়াম ও থোরিয়াম শ্রেণীতে সব সমসময়ই যুগ্ম ভরসংখ্যাবিশিষ্ট আইসোটোপের আবির্ভাব ঘটছে। কিন্তু এ্যাক্টিনিয়াম শ্রেণীর (প্রথম আইসোটোপ U^{235}) আইসোটোপগুলি সবসময়ই অযুগ্ম ভরসংখ্যাবিশিষ্ট। এর কারণ এই যে এইসব আইসোটোপগুলির মধ্যে শুধু আলফাক্ষরণ (যার ফলে ভরসংখ্যা চার কমে যায়) অথবা বিটাক্ষরণ ও গামাক্ষরণ (ভরসংখ্যার কোন পরিবর্ত্তন হয় না) ঘটতে পারে। প্রকৃতিজাত আইসোটোপগুলিকে এদের ভরসংখ্যা অনুসারেও তিনটি শ্রেণীতে ভাগ করা যায়, এগুলিকে বলা হয় যথাক্রমে $4n+2$, $4n$ এবং $4n+3$ শ্রেণী, এখানে n কোন একটি পূর্ণসংখ্যা। একটি আইসোটোপ কোন্ শ্রেণীতে আবির্ভূত হয় তা জানতে হলে এর ভর সংখ্যাকে 4 দ্বারা ভাগ করতে হয়। এইভাবে $238=4\times59+2$, সুতরাং U^{238} আইসোটোপটি $4n+2$ শ্রেণীতে থাকে, $227=4\times56+3$, সুতরাং Th^{227} আইসোটোপটি $4n+3$ শ্রেণীতে আবির্ভূত হবে। U^{238}-এর ক্ষরণজাত সমস্ত আইসোটোপগুলিই $4n+2$ শ্রেণীতে অন্তর্ভুক্ত, থোরিয়াম শ্রেণীটি হ'ল $4n$ শ্রেণী এবং $4n+3$ শ্রেণীটি এ্যাক্টিনিয়াম শ্রেণী। একটি $4n+1$ তেজস্ক্রিয় আইসোটোপের শ্রেণীও আছে, এর প্রথম আইসোটোপটির নাম ${}_{93}Np^{237}$, তবে এই আইসোটোপটি প্রকৃতির ভিতরে দেখতে পাওয়া যায় না, বর্ত্তমানে এটিকে কৃত্রিম উপায়ে প্রস্তুত করা যায়। $4n+1$ শ্রেণীটিকে বলা হয়

সাধারণ ভৌত প্রক্রিয়াগুলি থেকে স্বতন্ত্র ধরণের। তেজস্ক্রিয় পদার্থের ভিতর কখন যে কোন্ বিশেষ কেন্দ্রীনটির ক্ষরণ ঘটবে তা বলার কোন উপায় নেই, নির্দিষ্ট সময়ের ভিতর একটি বিশেষ কেন্দ্রীনের ক্ষরণ ঘটার সম্ভাব্যতা কত তাই শুধু পরীক্ষা এবং গণনার দ্বারা বলা যায় অর্থাৎ তেজস্ক্রিয় বিকিরণ পরিসংখ্যানের নীতি অনুযায়ী ঘটে। একটি মাত্র কেন্দ্রীনের ক্ষেত্রে অর্দ্ধ-জীবনকাল কথাটির বিশেষ কোন মূল্য নেই-কারণ ঐ কেন্দ্রীনটির ক্ষরণ কখন ঘটবে তা সম্পূর্ণ নির্দিষ্টভাবে বলার উপায় নেই, অর্দ্ধজীবনকালের তাৎপর্য্য বিপুলসংখ্যক তেজস্ক্রিয় পরমাণুর সমাবেশের পক্ষেই প্রযোজ্য কারণ তখন ঐ পরমাণুগুলি কতক্ষণের ভিতর ক্ষরিত হয়ে অর্দ্ধেকে পরিণত হয় তা নির্দিষ্টভাবে বলা যায়। তেজস্ক্রিয় ক্ষরণের এই পরিসংখ্যানধর্ম্মী প্রকৃতি বহুকাল আগেই বিজ্ঞানীদের নিকট প্রতিভাত হয় এবং এখান থেকেই প্রথম পরমাণু-বিজ্ঞানে সম্ভাব্যতার ধারণা প্রবেশ করে।

শুধুমাত্র বিশুদ্ধ সম্ভাব্যতার ধারণা প্রয়োগ ক'রে 7·4 এবং 7·5 সূত্রদ্বয় প্রতিষ্ঠা করা যায়। একটি নির্দিষ্ট সময়বিরতির মধ্যে একটি কেন্দ্রীনের ক্ষরণ ঘটার সম্ভাব্যতা নির্ভর করবে শুধু এই বিরতির পরিমাণের উপর, কেন্দ্রীনটির অতীত ইতিহাসের উপর তা নির্ভর করবে না। যদি Δt-এর পরিমাণ খুব কম হয় তবে আমরা ধরে নিতে পারি যে ঐ সময়ের ভিতর কেন্দ্রীনটির ক্ষরিত হবার সম্ভাব্যতা Δt-এর সমানুপাতী অর্থাৎ

$$P = \lambda \Delta t$$

λ একটি ধ্রুবক, P হ'ল Δt সময়ের মধ্যে কেন্দ্রীনের ক্ষরিত হবার সম্ভাব্যতা। এই Δt সময়ের ভিতরে কেন্দ্রীনটির ক্ষরণ ঘটতে পারে, নাও ঘটতে পারে; সম্ভাব্যতার তত্ত্ব থেকে ক্ষরণ ঘটা এবং না ঘটার সম্ভাব্যতার যোগফল এক। সুতরাং Δt সময়ের ভিতর ক্ষরণ না ঘটার সম্ভাব্যতা $1 - P = 1 - \lambda \Delta t$। $2\Delta t$ সময়ের ভিতর ক্ষরণ না ঘটার সম্ভব্যতা হবে

$$P = (1 - \lambda \Delta t)(1 - \lambda \Delta t) = (1 - \lambda \Delta t)^2$$

এবং এইভাবে $n\Delta t$ সময়ের ভিতর ক্ষরণ না ঘটার সম্ভাব্যতা $P = (1 - \lambda \Delta t)^n$। ধরা যাক মোট সময়ের পরিমাণ $n\Delta t = t$, সুতরাং t সময়ের ভিতর ক্ষরণ না ঘটার সম্ভাব্যতা হ'ল $P = \left(1 - \frac{\lambda t}{n}\right)^n$, যদি t-এর পরিমাণ নির্দিষ্ট হয় তবে যখন $\Delta t \to 0$ তখন $n \to \infty$, সুতরাং

$$P = \lim_{n \to \infty} \left(1 - \frac{\lambda t}{n}\right)^n$$

কিন্তু আমরা জানি যে

$$e^{-x} = \lim_{n\to\infty}\left(1-\frac{x}{n}\right)^n$$

সুতরাং আমরা পাই

$$P = e^{-\lambda t}$$

অর্থাৎ t পরিমাণ সময়ের মধ্যে একটি বিশেষ কেন্দ্রীনের ক্ষরিত না হবার সম্ভাব্যতা $e^{-\lambda t}$। মনে করা যাক শুরুতে N_0 সংখ্যক কেন্দ্রীন ছিল, যদি একটির ক্ষরণ না ঘটার সম্ভাব্যতা হয় $e^{-\lambda t}$ তবে t সময় বিরতির মধ্যে $N_0 e^{-\lambda t}$ সংখ্যক কেন্দ্রীনের ক্ষরণ ঘটবে না। সুতরাং ঐ সময়ের পর যদি মোট N সংখ্যক কেন্দ্রীন অবশিষ্ট থাকে তবে

$$N = N_0 e^{-\lambda t}$$

অর্থাৎ এভাবে আমরা 7·5 সূত্রটি প্রতিষ্ঠা করতে পেরেছি। এই সূত্রটি যে শুধু তেজষ্ক্রিয় বিকিরণের ক্ষেত্রেই সত্য তা নয়, আরও বহুসংখ্যক ক্ষরণশীল অবস্থা (যেমন পরমাণুর ভিতর ইলেকট্রনের উত্তেজিত শক্তিস্তর) থেকে বিকিরণের ক্ষেত্রেও এই সূত্রটি কার্য্যকরী। উপরের আলোচনা অনুসরণ ক'রে 7·4 সূত্রটিও অনুরূপভাবে প্রতিষ্ঠা করা যায়।

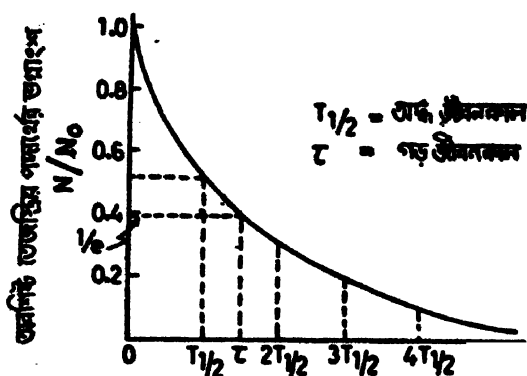
অর্দ্ধজীবনকাল (Half life)

অর্দ্ধজীবনকালের সংজ্ঞা আমরা পূর্ব্বেই দিয়েছি: মনে করা যাক যখন $t = T_{\frac{1}{2}}$ তখন $N = \frac{1}{2}N_0$, এই $T_{\frac{1}{2}}$-সময় বিরতিকে বলা হয় অর্দ্ধজীবনকাল অর্থাৎ এই সময় বিরতির পর মোট তেজষ্ক্রিয় কেন্দ্রীনের সংখ্যা অর্দ্ধেকে পরিণত হয়; 7·5 সূত্র থেকে

$$\tfrac{1}{2}N_0 = N_0 e^{-\lambda T_{\frac{1}{2}}}$$

$$T_{\frac{1}{2}} = \frac{\log_e 2}{\lambda} = \frac{0{\cdot}693}{\lambda} \qquad \cdots \qquad 7{\cdot}6$$

λ-এর পরিমাণ যদি পরীক্ষা দ্বারা নির্ণয় করা সম্ভব হয় তবে আমরা উপরোক্ত সূত্রটি প্রয়োগ ক'রে অর্দ্ধজীবনকাল মাপতে পারি। যদি N_0 সংখ্যক কেন্দ্রীন নিয়ে শুরু করা যায় তবে $T_{\frac{1}{2}}$ সময়ের পর $\frac{1}{2}N_0$ সংখ্যক কেন্দ্রীন অবশিষ্ট থাকে, $2T_{\frac{1}{2}}$ সময়ের পর $\frac{1}{4}N_0$ সংখ্যক কেন্দ্রীন অবশিষ্ট থাকে, ইত্যাদি।

অর্দ্ধজীবনকাল ছাড়া তেজস্ক্রিয় ক্ষরণে অন্য একভাবেও জীবনকাল মাপা হয়, তাকে বলা হয় গড়জীবনকাল। গড়জীবনকাল বলতে বোঝায় একটি তেজস্ক্রিয় কেন্দ্রীন গড়ে মোটের উপর কতক্ষণ ক্ষরিত না হয়ে অবস্থান করবে তার পরিমাণ। গড়জীবনকাল প্রত্যেকটি কেন্দ্রীনের জীবনকালের যোগফল ভাজিত পরমাণুগুলির প্রাথমিক সংখ্যা। গাণিতিক উপায়ে নিম্নলিখিতভাবে

চিত্র 7·4
তেজস্ক্রিয় ক্ষরণের সূত্রের সাহায্যে গড়জীবনকাল ও অর্দ্ধজীবনকালের সংজ্ঞা।

গড়জীবনকালের পরিমাণ নির্ণয় করা হয়; 7·4 ও 7·5 সূত্রদ্বয়ের সাহায্যে আমরা লিখতে পারি

$$\frac{dN}{dt} = \lambda N = \lambda N_0 e^{-\lambda t}$$

$$dN = \lambda N_0 e^{-\lambda t} dt$$

dN হ'ল যেসমস্ত পরমাণু t এবং $t+dt$ সময়ের মধ্যে ক্ষরিত হয় তাদের সংখ্যা। সুতরাং এই dN সংখ্যক পরমাণুর প্রত্যেকটির জীবনকালের যোগফল হবে

$$t dN = \lambda N_0 e^{-\lambda t} t \, dt$$

যেহেতু ক্ষরণের প্রকৃতি পরিসংখ্যানধর্মী পরমাণুগুলির 0 থেকে ∞ পর্য্যন্ত যেকোন জীবনকাল থাকতে পারে, সুতরাং পরমাণুগুলির জীবনকালের যোগফল হবে

$$\int^{\infty} \lambda N_0 e^{-\lambda t} t \, dt = \frac{N_0}{}$$

এবং গড়জীবনকালের পরিমাণ এথেকে

$$\tau = \frac{N_o/\lambda}{N_o} = \frac{1}{\lambda} \qquad 7·7$$

গড়জীবনকালের পরিমাণ ক্ষরণ ধ্রুবকের ব্যস্তরাশি, সুতরাং গড়জীবনকাল এবং অর্দ্ধজীবনকাল পরস্পরের সমানুপাতী এবং এদের পারস্পরিক সম্পর্ক হ'ল

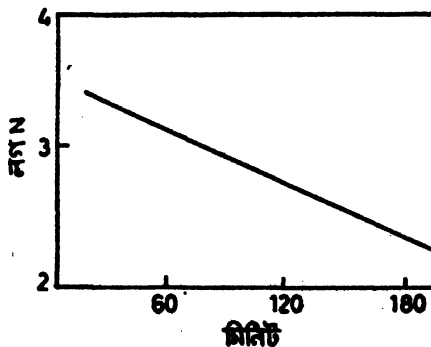
$$T_{\frac{1}{2}} = 0·693\ \tau$$

এই দুই ধরণের জীবনকালই তেজষ্ক্রিয় ক্ষরণের বিবরণে ব্যবহৃত হয়। λ-এর পরিমাণ নানারকম পদ্ধতিতে নির্ণয় করা সম্ভব, 7·4 সূত্রটির সাহায্যে আমরা পাই

$$\frac{R_t}{R_o} = \frac{\lambda N}{\lambda N_o} = e^{-\lambda t} \quad \cdots \quad 7·8$$

R_o এবং R_t যথাক্রমে পরীক্ষার ঠিক প্রারম্ভে এবং t সময় অতিক্রান্ত হবার পর তেজষ্ক্রিয় ক্ষরণের হার, 7·8 সূত্রটিকে 7·4 লেখচিত্রটিতে আঁকা হয়েছে। 7·8 সূত্রটিকে একটু অন্যভাবেও লেখা যায়

$$\log_e R_t = -\lambda t + \log_e R_o \quad \cdots \quad 7·9$$

এবং এবার 7·5 লেখটি অঙ্কন করা যায় যেখানে t, x-অক্ষ বরাবর এবং $\log R_t$ অর্থাৎ $\log N$, y-অক্ষ বরাবর ধরা হয়েছে। 7·9 সমীকরণ

চিত্র 7·5

অনুযায়ী লেখটি অবশ্যই একটি সরলরেখা হবে এবং এই সরলরেখাটির আপতন থেকে λ-র পরিমাণ নির্দ্ধারিত হয়। R_t-কে বলা হয় তেজষ্ক্রিয় পদার্থের সাময়িক ক্রিয়াশীলতা, এর পরিমাণ হ'ল প্রতি একক সময়ে যতগুলি ক্ষরণ

ঘটছে তার পরিমাণ। নানারকম গণনকারের সাহায্যে R_t নির্দ্ধারণ করা যায় এবং $\log R_t$ বনাম t-এর লেখচিত্র অঙ্কন করলে তেজষ্ক্রিয় পদার্থের ক্ষরণ ধ্রুবক নির্দ্ধারিত হয়। এই পদ্ধতিটি সেইসব তেজষ্ক্রিয় পদার্থের ক্ষেত্রে বিশেষ কার্য্যকরী যাদের অর্দ্ধজীবনকাল খুব বেশী নয় অথবা খুব কমও নয়। যদি অর্দ্ধজীবনকাল খুব বেশী হয় তবে পরীক্ষাধীন সময়ের ভিতর R_t-এর পরিমাণ খুব সামান্যই পরিবর্ত্তিত হয় সুতরাং এভাবে লেখ অঙ্কন ক'রে λ-র পরিমাণ তাথেকে নির্দ্ধারণ করা যাবে না (লেখটি এক্ষেত্রে হবে t অক্ষের সমান্তরাল একটি সরলরেখা)। আবার অর্দ্ধজীবনকাল যদি খুব কম হয়, যেমন এক সেকেণ্ডের ভগ্নাংশ, তবে এই পরীক্ষা করাই অসম্ভব। সাধারণতঃ কয়েক মিনিট থেকে কয়েকদিন পর্য্যন্ত অর্দ্ধজীবনকাল এই পদ্ধতিতে সহজে নির্দ্ধারণ করা যায়। যদি পরীক্ষাধীন পদার্থের ভিতর একাধিক তেজষ্ক্রিয় কেন্দ্রীন বিদ্যমান থাকে যাদের অর্দ্ধজীবনকাল সম্পূর্ণ পৃথক তাহলে লগ R_t বনাম t-এর লেখটি আর সরলরেখা হবে না, একাধিক কেন্দ্রীনের মিলিত প্রভাবে এটি সাধারণতঃ হবে একটি বক্ররেখা। অবশ্য গাণিতিক বিশ্লেষণের দ্বারা কোন কোন ক্ষেত্রে ঐসব বক্ররেখা বিশ্লেষণ ক'রেও অংশগ্রহণকারী বিভিন্ন কেন্দ্রীনের ক্ষরণধ্রুবক মাপা যায়।

যখন কোন কেন্দ্রীনের অর্দ্ধজীবনকাল খুব বেশী অর্থাৎ পরীক্ষাধীন সময়ের ভিতর তেজষ্ক্রিয় ক্ষরণের হারের তারতম্য ঘটার পরিমাণ খুব কম, সেসব ক্ষেত্রে সরাসরি 7·4 সূত্র প্রয়োগ ক'রে অর্দ্ধজীবনকাল মাপা সম্ভব। এই সূত্রটি ব্যবহার করতে হলে একটি বিশেষ মুহূর্ত্তে N এবং $\frac{dN}{dt}$ উভয়ের মান জানা থাকা দরকার। তেজষ্ক্রিয় বিকিরণের হার গাইগার-মুলার গণনকার ইত্যাদি যন্ত্রের সাহায্যে মাপা যায়। পরীক্ষাধীন পদার্থের ওজন, এর পারমাণবিক ওজন এবং এ্যাভোগাড্রো সংখ্যা, এসবের সাহায্যে বিকিরণক্ষম পরমাণুর সংখ্যা N সহজেই নির্ণয় করা যায়; এই পদ্ধতিতে ইউরেনিয়াম ইত্যাদি অতি দীর্ঘস্থায়ী তেজষ্ক্রিয় পদার্থের অর্দ্ধজীবনকাল মাপা সম্ভব। এইসব পরীক্ষায় Δt-এর পরিমাণ অনেক সময় কয়েক ঘণ্টা কিংবা আরও অধিক হতে পারে, কিন্তু তাহলেও ঐ সময়ের মধ্যে N কিংবা $\frac{dN}{dt}$-এর পরিবর্ত্তন হয় নেহাৎই নগণ্য।

উদাহরণ : পরীক্ষায় দেখা গেছে যে এক গ্রাম বিশুদ্ধ ইউরেনিয়াম 238 আইসোটোপ থেকে প্রতি সেকেণ্ডে $1·2 \times 10^4$ সংখ্যক আলফাকণা নির্গত হয়। 238 গ্রাম U^{238}-এর ভিতর মোট পরমাণু-সংখ্যা $6·06 \times 10^{23}$ অর্থাৎ

অ্যাভোগাড্রো সংখ্যা। এক গ্রাম U^{238} আইসোটোপে 2.54×10^{21} সংখ্যক পরমাণু থাকে, সুতরাং

$$\lambda = \frac{dN}{dt} \Big/ N = \frac{1.2 \times 10^4}{2.54 \times 10^{21}} = 4.7 \times 10^{-18}/\text{সেকেণ্ড}$$

এবং U^{238}-এর অর্দ্ধজীবনকাল

$$= \frac{0.693}{4.7 \times 10^{-18} \times 60^2 \times 24 \times 365} \text{ বছর}$$

$$= 4.6 \times 10^9 \text{ বছর।}$$

তেজস্ক্রিয় শ্রেণী এবং তেজস্ক্রিয় স্থিতাবস্থা (Radio-active series & radio-active equilibrium)

যদি কিছু পরিমাণ বিশুদ্ধ তেজস্ক্রিয় পদার্থ নিয়ে শুরু করা যায় তবে কিছু সময় পরে এর ভিতর ক্ষরণের ফলে অন্যান্য পদার্থের আবির্ভাব হয়। একটি তেজস্ক্রিয় ক্ষরণের ফলে যেসব পদার্থ আবির্ভূত হয় সেগুলিও তেজস্ক্রিয় হতে পারে এবং এদের ক্ষরণের দ্বারাও নূতন নূতন তেজস্ক্রিয় পদার্থ সৃষ্টি হতে পারে। এইভাবেই একটি তেজস্ক্রিয় শ্রেণীর উদ্ভব হয়। বর্তমানে আমরা একটি তেজস্ক্রিয় শ্রেণীর ক্ষরণের সূত্র বিচার করব, আমাদের বিচার্য্য হবে অপেক্ষাকৃত সরল একটি শ্রেণী। মনে করা যাক এই শ্রেণীটিতে আছে তিনটি বিভিন্ন তেজস্ক্রিয় পদার্থ A, B এবং C; A ক্ষরিত হয়ে B এবং B ক্ষরিত হয়ে C উৎপন্ন হয়, C-ও তেজস্ক্রিয়, এদের ক্ষরণধ্রুবকগুলি হ'ল যথাক্রমে λ_1, λ_2, λ_3। ধরা যাক, x, y, z হ'ল t সময় বিরতির পর মিশ্রণের ভিতর যথাক্রমে A, B এবং C পদার্থের পরমাণুর সংখ্যা। B পদার্থের পরমাণুগুলির বর্দ্ধনের হার হবে A পরমাণুগুলির ক্ষরণের দ্বারা সংগৃহীত B পরমাণুর সংখ্যা এবং B-এর নিজস্ব ক্ষরণের ফলে বিনষ্ট পরমাণুর সংখ্যা, এই দুই-এর বিয়োগফল। সুতরাং B পরমাণুগুলির বর্দ্ধনের হার-এর জন্য আমরা লিখতে পারি

$$\frac{dy}{dt} = \lambda_1 x - \lambda_2 y \qquad \cdots \qquad 7.10$$

ঠিক একইভাবে C পদার্থের পরমাণুগুলির বর্দ্ধনের হার হবে

$$\frac{dz}{dt} = \lambda_2 y - \lambda_3 z \qquad \cdots \qquad 7.11$$

আমরা গণনা অপেক্ষাকৃত সহজ করার জন্য ধরে নেব যে প্রাথমিক অবস্থায় অর্থাৎ যখন $t=0$ তখন A পদার্থের N_0 সংখ্যক পরমাণু উপস্থিত আছে এবং B ও C পদার্থের কোন পরমাণু উপস্থিত নেই। তেজস্ক্রিয় ক্ষরণের সূত্র থেকে আমরা জানি যে t সময় পর A পদার্থের পরমাণুর সংখ্যা হবে

$$x=N_0e^{-\lambda_1 t}$$

এই সম্বন্ধটি 7·10 সূত্রে প্রয়োগ করলে আমরা পাই

$$\frac{dy}{dt}=\lambda_1 N_0e^{-\lambda_1 t}-\lambda_2 y$$

এবার উভয় দিকেই $e^{\lambda_2 t}$ দিয়ে গুণ করলে এবং পক্ষান্তর করলে

$$e^{\lambda_2 t}\frac{dy}{dt}+\lambda_2 ye^{\lambda_2 t}=\lambda_1 N_0e^{(\lambda_2-\lambda_1)t}$$

$$\frac{d}{dt}(ye^{\lambda_2 t})=N_0\lambda_1\, e^{(\lambda_2-\lambda_1)t}$$

এবার উভয়পক্ষকে সমাকলন করলে

$$ye^{\lambda_2 t}=\frac{N_0\lambda_1}{\lambda_2-\lambda_1}\, e^{(\lambda_2-\lambda_1)t}+C' \quad \cdots \quad 7\cdot12$$

যোজনগ্রুবক C' নির্ণয় করা যায় এইভাবে, যখন $t=0$ তখন $y=0$ এবং এথেকে

$$C'=-\frac{\lambda_1 N_0}{\lambda_2-\lambda_1}$$

সুতরাং এখন C'-এর এই পরিমাণকে 7·12 সম্বন্ধটিতে নিয়োগ করলে আমরা পাই

$$y=\frac{N_0\lambda_1}{\lambda_2-\lambda_1}\,[e^{-\lambda_1 t}-e^{-\lambda_2 t}] \quad \cdots \quad 7\cdot13$$

এই সমীকরণটি থেকে নির্দিষ্ট সময় t পর B পরমাণুগুলি মোট কত সংখ্যায় উপস্থিত থাকে তা নির্ধারিত হয়।

এবার Z-এর জন্য যে সমীকরণ তাতে y-এর উপরিপ্রদত্ত প্রকাশন প্রয়োগ করলে দাঁড়ায়

$$\frac{dz}{dt}=\lambda_2 y-\lambda_3 z$$

$$=\frac{\lambda_1\lambda_2}{\lambda_2-\lambda_1}N_0\,[e^{-\lambda_1 t}-e^{-\lambda_2 t}]-\lambda_3 z$$

একটি পক্ষান্তর ক'রে এবং $e^{\lambda_3 t}$ দিয়ে গুণ ক'রে আমরা লিখতে পারি

$$e^{\lambda_3 t}\frac{dz}{dt}+\lambda_3 z e^{\lambda_3 t}=\frac{\lambda_1\lambda_2}{\lambda_2-\lambda_1}\,N_0\,[e^{-\lambda_1 t}-e^{-\lambda_2 t}]\,e^{\lambda_3 t}$$

$$\frac{d}{dt}\,(ze^{\lambda_3 t})=\frac{N_0\lambda_1\lambda_2}{\lambda_2-\lambda_1}\,[e^{(\lambda_3-\lambda_1)t}-e^{(\lambda_3-\lambda_2)t}]$$

এবার উভয় পক্ষকে সমাকলন করলে

$$ze^{\lambda_3 t}=\frac{N_0\lambda_1\lambda_2}{\lambda_2-\lambda_1}\left[\frac{e^{(\lambda_3-\lambda_1)t}}{\lambda_3-\lambda_1}-\frac{e^{(\lambda_3-\lambda_2)t}}{\lambda_3-\lambda_2}\right]+\frac{N_0\lambda_1\lambda_2}{\lambda_2-\lambda_1}\,C''$$

যখন $t=0$ তখন $z=0$, এথেকে C''-এর পরিমাণ নির্ণয় করা যায়

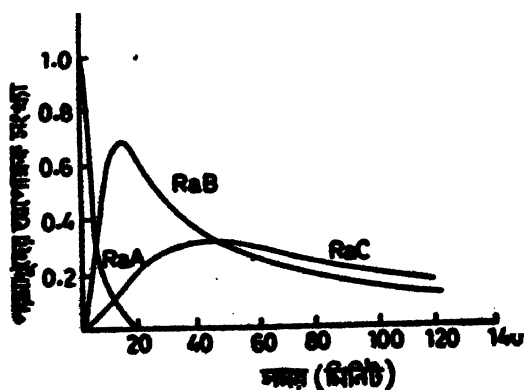
$$C''=\frac{\lambda_2-\lambda_1}{(\lambda_3-\lambda_1)(\lambda_3-\lambda_2)}$$

সুতরাং z নিম্নলিখিত সমীকরণ দ্বারা প্রদত্ত হয়

$$z=\lambda_1\lambda_2 N_0\left[\frac{1}{(\lambda_2-\lambda_1)(\lambda_3-\lambda_1)}\,e^{-\lambda_1 t}+\frac{1}{(\lambda_1-\lambda_2)(\lambda_3-\lambda_2)}\,e^{-\lambda_2 t}+\frac{1}{(\lambda_1-\lambda_3)(\lambda_2-\lambda_3)}\,e^{-\lambda_3 t}\right] \quad 7{\cdot}14$$

7·14 সমীকরণটি থেকে t সময় পর উপস্থিত C পরমাণুগুলির সংখ্যা জানা যায়। যদি λ_1, λ_2, λ_3-এর পরিমাণ জানা থাকে তবে তাথেকে আমরা y এবং z-এর পরিমাণ উপরিলিখিত 7·13 ও 7·14 সমীকরণগুলি প্রয়োগ ক'রে নির্ণয় করতে পারি। উপরের গণনায় একের পর এক তিনটি বিভিন্ন তেজস্ক্রিয় পদার্থের আবির্ভাব বিচার করা হয়েছে, কিন্তু একই পদ্ধতি অনুসরণ ক'রে এবং অনুরূপ ধরণের সমীকরণ স্থাপন ক'রে এই সমস্যা একের পর এক n-সংখ্যক বিভিন্ন তেজস্ক্রিয় কেন্দ্রীনের আবির্ভাবের জন্যও সমাধান করা সম্ভব।

7·4, 7·13 এবং 7·14 সমীকরণগুলি থেকে প্রাপ্ত ফলাফল একটি লেখ-চিত্রের সাহায্যে খুব সুন্দরভাবে উপস্থাপিত করা যায়, উদাহরণ হিসাবে কোন একটি তেজস্ক্রিয় শ্রেণীতে ক্রমান্বয়ে ক্ষরণের কথা ধরা যেতে পারে। যদি একটি ধাতুর প্লেটকে র‍্যাডন গ্যাসের সংস্পর্শে কিছুক্ষণ রাখা যায় তবে র‍্যাডনের ক্ষরণের ফলে উৎপন্ন RaA ($_{84}Po^{218}$) তেজস্ক্রিয় আইসোটোপ এই প্লেটের উপর এসে জমা হতে থাকে, এই আইসোটোপের অর্দ্ধজীবনকাল 3·05

মিনিট। RaA-এর আলফাকরণের ফলে RaB ($_{82}Pb^{214}$) সৃষ্টি হয় যার অর্দ্ধজীবনকাল 26·8 মিনিট, আবার RaB-এর বিটাকরণের ফলে উৎপন্ন হয় RaC ($_{83}Bi^{214}$) যার অর্দ্ধজীবনকাল 19·7 মিনিট এবং পরিশেষে উৎপন্ন হয় RaD ($_{82}Pb^{210}$) যেটির অর্দ্ধজীবনকাল 22 বছর। যেহেতু RaD-এর অর্দ্ধজীবনকাল তুলনামূলকভাবে অনেক বেশী, যে হারে এই আইসোটোপটির করণ হয় তা আমরা অবহেলা করতে পারি। এক্ষেত্রে A, B এবং C বলতে যথাক্রমে যদি RaA, RaB এবং RaC কেন্দ্রীনগুলি বোঝান হয় তবে উপরিলিখিত সমীকরণগুলি ব্যবহার ক'রে সময় বনাম করণোত্তর আইসোটোপগুলির সংখ্যার লেখ অঙ্কন করা যায়, 7·5 চিত্রে এই লেখগুলি দেখান হয়েছে। RaA (রেডিয়াম A) কেন্দ্রীনগুলি ঠিক 7·5 সূত্র অনুযায়ী ক্ষরিত হতে থাকে, RaB কেন্দ্রীনগুলির সংখ্যা প্রথমে থাকে শূন্য, পরে এদের সংখ্যা ক্রমশঃ বৃদ্ধি পেয়ে একটি চরমাবস্থায় উপনীত হয়, তারপর আবার সময়ের সঙ্গে ধীরে ধীরে হ্রাস পেতে থাকে। RaC কেন্দ্রীনগুলির সংখ্যাও একটি চরমসংখ্যায় উপনীত হবার পর ক্রমশঃ হ্রাস পায়। বিভিন্ন কেন্দ্রীনগুলির সম্মিলিত সংখ্যা N_0 কিন্তু সবসময়ই ধ্রুব থাকে।

7·6 চিত্র
জনক (RaA) ও সন্তান (RaB), (RaC) কেন্দ্রীনের সমবেত করণের প্রকৃতি।

এবার আমরা একটি সরলতর অবস্থা কল্পনা করি যেখানে শুধু জনক এবং সন্তান কেন্দ্রীন উপস্থিত; আমরা দেখেছি যে t সময় পর সন্তান কেন্দ্রীনের সংখ্যা হবে

$$y = \frac{N_0\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1}\left[e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t}\right] \quad \cdots \quad 7·15$$

এই বিশেষ ক্ষেত্রে ধরা যাক 'A'-এর জীবনকাল 'B'-এর তুলনায় খুবই কম অর্থাৎ এই অবস্থায় $\lambda_1 >> \lambda_2$, এরকম অবস্থায় উপরের সমীকরণটি মোটামুটি দাঁড়ায়

$$y = N_0 e^{-\lambda_2 t}$$

অর্থাৎ সন্তানটি এর নিজস্ব জীবনকাল নিয়েই ক্ষরিত হতে থাকে।

অবার একটি বিশেষ পারিস্থিতির উদ্ভব হয় যখন 'A', 'B'-এর তুলনায় অত্যাধিক দীর্ঘজীবী হয়, অর্থাৎ $\lambda_1 << \lambda_2$। যখন t যথেষ্ট পরিমাণে বর্দ্ধিত হয় তখন আমরা $e^{-\lambda_1 t}$-এর তুলনায় $e^{-\lambda_2 t}$-কে সম্পূর্ণ অবহেলা করতে পারি। সুতরাং 7·11 সূত্রে λ_2-এর তুলনায় λ_1-কে এবং $e^{-\lambda_2 t}$-কে অবহেলা করলে আমরা পাই

$$N_2(t) = N_1(0) e^{-\lambda_1 t} \cdot \frac{\lambda_1}{\lambda_2}$$

এখানে $N_1(t)$ এবং $N_2(t)$ বলতে আমরা বোঝাচ্ছি যথাক্রমে t সময় পরে A এবং B কেন্দ্রীনগুলির সংখ্যা। এই অবস্থায় সন্তানের ক্ষরণের হার এর জনকের ক্ষরণের হার দ্বারা নির্দ্ধারিত হয়। সুতরাং এই উভয় ক্ষেত্রেই অধিক দীর্ঘজীবী কেন্দ্রীনের ক্ষরণের দ্বারাই শেষ পর্য্যন্ত প্রান্তিক ক্ষরণের হার নির্দ্ধারিত হয়। যদি এমন হয় যে "A"-এর জীবনকাল শুধু "B"-এর তুলনায় অত্যাধিক বেশীই নয়, আবার যে সময়ের মধ্যে পরীক্ষা করা হচ্ছে তার তুলনায়ও অত্যাধিক বেশী হয় তবে পরীক্ষাধীন সময়ের মধ্যে $e^{-\lambda_1 t}$ রাশিটির খুব বেশী পরিবর্ত্তন হয় না, অর্থাৎ এই অবস্থায় $e^{-\lambda_1 t} \simeq 1$। এই অবস্থায় $N_2(t)$-এর পরিমাণ ক্রমশঃ একটি ধ্রুব পরিমাণের দিকে পৌঁছয় এবং তা হ'ল

$$N_2 = N_1(0) \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \left(1 - e^{-\lambda_2 t}\right) \simeq N_1(0) \frac{\lambda_1}{\lambda_2}$$

এথেকে আমরা পাই

$$\lambda_2 N_2 = \lambda_1 N_1 \quad \cdots \quad 7·16$$

একেবারে শুরুতে N_2-এর পরিমাণ যাই হউক না কেন, এটি ক্রমশঃ 7·16 সমীকরণ প্রদত্ত পরিমাণের দিকে অগ্রসর হয়। এই ধরনের সমাবস্থার উদ্ভব হয় যখন কোন তেজস্ক্রিয় পদার্থ একই হারে সৃষ্টি হতে থাকে, সম্ভবতঃ কোন দীর্ঘজীবী জনকের ক্ষরণের দ্বারা অথবা কোন চক্রত্বরক বা পারমাণবিক চুল্লী থেকে উৎপন্ন কণার সাহায্যে নির্দ্দিষ্ট ধ্রুব হারে কণাদের দ্বারা। উভয় ক্ষেত্রেই

N_2-এর কয়েকটি অর্দ্ধজীবনকাল অপেক্ষা করার পর এটি এর স্থিতাবস্থায় উপনীত হয়, তখন এর ক্ষরণের হার $N_2\lambda_2$, এর ধ্রুব প্রজননের হারের $(N_1\lambda_1)$ সমান হয়।

এই স্থিতাবস্থার তত্ত্ব প্রয়োগ করা যায় ইউরেনিয়াম এবং থোরিয়াম সমন্বিত খনিজের ক্ষেত্রে, এই পদার্থগুলি ক্ষরণের ফলে এক একটি তেজস্ক্রিয় শ্রেণী সৃষ্টি করে। যেহেতু এদের উভয়েরই অর্দ্ধজীবনকাল অত্যধিক বেশী আমরা বলতে পারি যে N_2 ক্রমশঃ একটি ধ্রুব পরিমাণে উপনীত হবে এবং ঐ পরিমাণ পাওয়া যাবে 7·16 সূত্র প্রয়োগ ক'রে। যেহেতু N_2-এর পরিমাণ নির্দ্দিষ্ট, তেজস্ক্রিয় পদার্থ "2"-এর ক্ষরণের হারও নির্দ্দিষ্ট, সুতরাং তেজস্ক্রিয় "3" পদার্থটিও স্থিতাবস্থায় বিদ্যমান থাকবে ; সুতরাং এথেকে সাধারণভাবে আমরা লিখতে পারি

$$N_1\lambda_1 = N_2\lambda_2 = N_3\lambda_3 = \cdots\cdots \qquad \cdots \qquad 7{\cdot}17$$

এরূপ পরিস্থিতিতে প্রতিটি সত্তাই ধ্রুব অথচ বিভিন্ন পরিমাণে উপস্থিত থাকবে। একমাত্র প্রথমটি ছাড়া আর বাকি প্রতিটি তেজস্ক্রিয় পদার্থই ক্ষরিত এবং প্রজনিত হবে নির্দ্দিষ্ট $N_1\lambda_1$ হারে। 7·17 সূত্রটি প্রয়োগ ক'রে অতিদীর্ঘ জীবনকালগুলি মাপা সম্ভব। স্থিতাবস্থা উপস্থিত থাকলে একটি পরবর্ত্তী বংশধরকে রাসায়নিক উপায়ে পৃথক ক'রে এর উপস্থিত পরমাণু সংখ্যা, অর্দ্ধজীবনকাল এবং প্রাথমিক জনক কেন্দ্রীনগুলির সংখ্যা নির্ণয় করলেই তাথেকে প্রাথমিক পদার্থের অর্দ্ধজীবনকাল মাপা সম্ভব হয়। তবে তেজস্ক্রিয় স্থিতাবস্থা উৎপন্ন হতে হলে জনক এবং বংশধর পদার্থগুলির একত্র অবস্থান প্রয়োজনীয়।

উদাহরণ : ইউরেনিয়াম শ্রেণীতে তেজস্ক্রিয় রেডিয়াম আবির্ভূত হয় এজন্য ইউরেনিয়াম খনিজে রেডিয়াম তেজস্ক্রিয় স্থিতাবস্থায় থাকে। দেখা গেছে যে খনিজ পদার্থের ভিতর প্রতি $2{\cdot}8\times10^6$ ইউরেনিয়াম (U^{238}) পরমাণুর জন্য একটি ক'রে রেডিয়ামের পরমাণু থাকে, যদি এদের পরমাণুর সংখ্যাকে যথাক্রমে N_1 এবং N_2 আখ্যা দেওয়া হয় তবে

$$\frac{\lambda_2}{\lambda_1} = \frac{T_1}{T_2} = \frac{N_1}{N_2} = 2{\cdot}8\times10^6$$

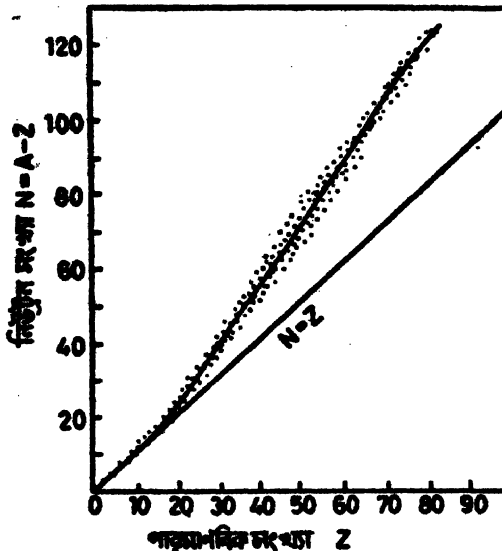
T_1 এবং T_2 যথাক্রমে এদের অর্দ্ধজীবনকাল, সুতরাং

$$T_1 = 2{\cdot}8\times10^6\times1620 = 4{\cdot}5\times10^9 \text{ বছর।}$$

পরীক্ষায় দেখা যায় যে এক গ্রাম বিশুদ্ধ রেডিয়াম থেকে প্রতি সেকেণ্ডে 3.70×10^{10} সংখ্যক ক্ষরণ ঘটে। এই সংখ্যাটিকে তেজস্ক্রিয় সামগ্রিক ক্রিয়াশীলতার একক হিসাবে ধরা হয়, একে বলা হয় এক ক্যুরী। ডাক্তারী পরীক্ষায় সাধারণতঃ এক মিলিক্যুরী একক হিসাবে ব্যবহৃত হয়। অপর একটি একক হ'ল রাদারফোর্ড, প্রতি সেকেণ্ডে 10^6 সংখ্যক ক্ষরণকে এক রাদারফোর্ড আখ্যা দেওয়া হয়ে থাকে।

কেন্দ্রীনের স্থায়িত্ব

স্থায়ী কেন্দ্রীনগুলির একটা লেখচিত্র 7·7 চিত্রের লেখটিতে দেখান হয়েছে, এখানে বিন্দুগুলি মোটামুটিভাবে এক একটি স্থায়ী কেন্দ্রীনের অবস্থান নির্দেশ

চিত্র 7·7

প্রকৃতিজাত স্থায়ী কেন্দ্রীকসমূহের লৈখিক বর্ণনা। স্থায়িত্বের রেখাটি কতগুলি স্থায়ী কেন্দ্রীনকে সংযুক্ত করে এবং সমস্ত স্থায়ী কেন্দ্রীনই এই রেখার উভয় পার্শ্বে এক সংকীর্ণ পরিসরের মধ্যে অবস্থান করে। অপর সরলরেখাটি N = Z কেন্দ্রীনগুলিকে নির্দেশ করে এবং সেগুলি অধিকাংশই তেজস্ক্রিয়।

করে। যে রেখাটি অধিকাংশ স্থায়ী কেন্দ্রীনগুলির মধ্য দিয়ে যায় তাকে বলা হয় স্থায়িত্বের রেখা। নিউট্রনসংখ্যা বনাম প্রোটনসংখ্যার এই লেখটি থেকে কেন্দ্রীনের গঠন-সংক্রান্ত কতগুলি ব্যাপার স্পষ্টভাবে বোঝা যায়। স্পষ্টই দেখা যায় যে সমুদয় স্থায়ী কেন্দ্রীন N ও Z সংখ্যার সংকীর্ণ পরিসরের মধ্যে সীমাবদ্ধ থাকে, অর্থাৎ নির্দিষ্ট প্রোটনসংখ্যার জন্য সম্ভাব্য বিভিন্ন নিউট্রন-সংখ্যাগুলি যথেষ্ট সীমাবদ্ধ। যদি একটি কেন্দ্রীনের ভিতর অত্যধিক বা অত্যল্প

সংখ্যক নিউট্রন থাকে তবে এটি অস্থায়ী হবে। স্থায়ী হতে হলে তখন এটি ইলেকট্রন অথবা পজিট্রন ক্ষরণ করবে। এসব ক্ষেত্রে ক্ষরণোত্তর কেন্দ্রীনটি সবসময়ই স্থায়িত্বের রেখার নিকটবর্তী থাকে।

স্থায়ী কেন্দ্রীনগুলির মধ্যে নিউট্রন ও প্রোটনসংখ্যার অনুপাতের দিকে লক্ষ্য করলে আমরা দেখি যে এদের ভিতর নিউট্রনসংখ্যা সবসময়ই প্রোটনসংখ্যার সমান অথবা অধিক হয়। ব্যতিক্রম শুধু দেখা যায় হাইড্রোজেন H (একটি প্রোটন) ও $_{2}He^{3}$ (2 প্রোটন + 1 নিউট্রন)-এর ভিতর। সমান সমান প্রোটন ও নিউট্রন সংখ্যা লক্ষ্য করা যায় শুধু কিছুসংখ্যক হাল্কা কেন্দ্রীনের মধ্যে, কয়েকটি উদাহরণ হ'ল $He^{4}(2n, 2p)$, $C^{12}(6n, 6p)$, $O^{16}(8n, 8p)$, $Ne^{20}(10n, 10p)$ এবং $Ca^{40}(20n, 20p)$। Ca^{40} আইসোটোপের পর থেকে নিউট্রনসংখ্যার অনুপাত ধারাবাহিকভাবে বৃদ্ধি পেতে থাকে, ভারী কেন্দ্রীনগুলির মধ্যে এই অনুপাত শেষ পর্যন্ত গিয়ে দাঁড়ায় প্রায় 1·6।

7·7 চিত্রের লেখটি থেকে বোঝা যায় যে অধিকাংশ কেন্দ্রীনই $N = Z$ রেখাটির মোটামুটি নিকটে থাকে। এথেকে বোঝা যায় যে কেন্দ্রীনের ভিতর নিউট্রন ও প্রোটনের মধ্যে একরকম জোড়াসৃষ্টিকারী বলের (pairing force) অস্তিত্ব আছে। শুধু নিউট্রন ও প্রোটনের ভিতরই এরকম জোড়াবদ্ধ স্থায়ী অবস্থার সৃষ্টি হয় যা প্রোটন-প্রোটন বা নিউট্রন-নিউট্রন জোড়ার ক্ষেত্রে ঘটে না। এর উদাহরণ হ'ল ডিউটেরন যা নিউট্রন ও প্রোটনের আকর্ষী বলের প্রভাব হেতু উৎপন্ন হয়, কিন্তু জগতে দুটি নিউট্রন বা দুটি প্রোটনের স্থায়ী জোড়াবদ্ধ অবস্থা দেখতে পাওয়া যায় না।

স্পষ্টই বোঝা যায় যে যদি আমরা একটি হাল্কা কেন্দ্রীনের মধ্যে ক্রমাগত সমসংখ্যার প্রোটন এবং নিউট্রন যোগ ক'রে ভারী কেন্দ্রীন সৃষ্টি করতে চাই তবে ঐভাবে সৃষ্ট কেন্দ্রীন অধিকাংশ ক্ষেত্রেই স্থায়ী হবে না। এর কারণ অধিকসংখ্যক প্রোটন কেন্দ্রীনে থাকলে সেখানে এদের মধ্যে পারস্পরিক কুলম্ব বিকর্ষণী বলের প্রভাব খুব বেশী হয়। এজন্য ক্রমাগত np জোড়া কেন্দ্রীনের মধ্যে যোগ ক'রে গেলে শেষ পর্যন্ত এই কুলম্ব বিকর্ষণী বল এত অধিক হয় যে তা কেন্দ্রীনের আকর্ষী বলগুলির প্রভাব অতিক্রম ক'রে যায়। এই অবস্থায় অধিকতর সংখ্যক নিউট্রন যোগ করলে কুলম্ব বলের প্রভাব হ্রাস পায় এবং কেন্দ্রীনের আকর্ষী বলের পরিমাণ বৃদ্ধিপ্রাপ্ত হয়। অবশ্য যদি অত্যধিক সংখ্যায় নিউট্রন যোগ করা যায় তবে কেন্দ্রীনটি পুনরায় ভারসাম্য হারিয়ে অস্থায়ী হয়ে পড়ে এবং কোন ক্ষরণের দ্বারা স্থায়িত্বের রেখার দিকে ফিরে আসতে চেষ্টা করে।

প্রশ্নমালা

(1) কিছু পরিমাণ থোরিয়ামের শতকরা 10 ভাগ কত সময়ের মধ্যে ক্ষরিত হয়ে যাবে? ধরা যাক থোরিয়ামের অর্দ্ধজীবনকাল 1.4×10^{10} বছর। [2.12×10^{9} বছর]

(2) যদি ইউরেনিয়াম, রেডিয়াম এবং র‍্যাড্‌নের অর্দ্ধজীবনকাল যথাক্রমে হয় 4.5×10^{9} বছর, 1620 বছর এবং 3.8 দিন তবে একটি ইউরেনিয়াম খনিজের মধ্যে এদের আপেক্ষিক পরিমাণ কত হবে নির্ণয় কর। ধরে নেওয়া যাক যে ঐ খনিজের ভিতর থেকে র‍্যাডন আদৌ নির্গত হতে পারে না। [$4.3 \times 10^{11} : 1.5 \times 10^{5} : 1$]

(3) কিছু পরিমাণ সদ্যপ্রস্তুত RaF (Po^{210})-এর মধ্যে এই আইসোটোপটি 1.00×10^{-6} গ্রাম পরিমাণ রয়েছে। প্রস্তুতের পরমুহূর্তে প্রতি সেকেণ্ডে কতগুলি তেজস্ক্রিয় বিকিরণ এর ভিতর থেকে ঘটতে থাকবে? ক্যুরী এবং রাদারফোর্ডে প্রকাশ কর।

[4.5 মিলিক্যুরী, 166.4 রাদারফোর্ড]

(4) র‍্যাডনের অর্দ্ধজীবনকাল 3.82 দিন। একদিনে সদ্যপ্রস্তুত র‍্যাডনের মধ্য থেকে এর কত অংশের ক্ষরণ ঘটবে? কত অংশ দশদিনে ক্ষরিত হয়ে যাবে? [16.5% একদিনে ; 83.6% দশদিনে]

(5) $_{28}Ni^{64}$ কেন্দ্রীনটির মোট বন্ধনশক্তি এবং কণাপ্রতি বন্ধনশক্তি কত হবে নির্ণয় কর। (এই আইসোটোপের ভর = 63.9481 এ এম ইউ) [561.1 এবং 8.77 এম ই ভি]

(6) UX_1 (Th^{234}) এর অর্দ্ধজীবনকাল 24.1 দিন, এর ক্ষরণের ফলে UX_2 (Pa^{234}) আইসোটোপ উৎপন্ন হয়। সদ্যপ্রস্তুত UX_1 কতদিন পর 90% UX_2 তে পরিণত হবে? [80 দিন]

(7) প্রতি গ্রাম রেডিয়াম থেকে প্রতি সেকেণ্ডে 3.67×10^{10} সংখ্যক আলফাকণা নির্গত হতে দেখা যায়। রেডিয়ামের পারমাণবিক ভর 226, এর অর্দ্ধজীবনকাল কত? [1596 বছর]

(8) রেডিয়ামের ক্ষরণধ্রুবক 1.38×10^{-11}/সেক, এর পারমাণবিক ওজন 226 এবং U^{238}-এর পারমাণবিক ওজন 238। দেখা যায় যে 0.331 মাইক্রোগ্রাম রেডিয়াম এক গ্রাম U^{238}-এর সঙ্গে স্থিতাবস্থায় আছে। U^{238}-এর অর্দ্ধজীবনকাল কত? [4.56×10^{9} বছর]

(9) একটি আলফাকণা একটি হাইড্রোজেন কেন্দ্রীনকে আঘাত করছে যার ফলে এটি সোজা সামনের দিকে নিক্ষিপ্ত হয়ে যাচ্ছে। শক্তি ও ভরবেগ সংরক্ষণ নীতি প্রয়োগ ক'রে নিক্ষিপ্ত হাইড্রোজেন কেন্দ্রীন এবং আপতিত আলফাকণার গতিবেগের অনুপাত নির্ণয় কর। [1·6]

(10) RaC' থেকে নির্গত আলফাকণার দৌড়দূরত্ব 7·0 সেমি এবং নির্গমন গতিবেগ 2×10^{9} সেমি/সেক। পূর্ববর্তী সমস্যাটির ফলাফল এবং একই গতিবেগে আলফাকণা ও প্রোটনের দৌড়দূরত্ব প্রায় সমান এবং আলফাকণার দৌড়দূরত্ব এর গতিবেগের ঘনফলের সমানুপাতী ধ'রে নিয়ে একটি প্রোটনের দৌড়দূরত্ব নির্ণয় কর যেটি RaC' আলফাকণার দ্বারা সোজা সম্মুখে নিক্ষিপ্ত হয়। [28·7 সেমি]

(11) যদি 82টি প্রোটন এবং 126টি নিউট্রন একত্র ক'রে একটি Pb^{208} কেন্দ্রীন গঠন করা যায় তবে তার ফলে কত শক্তি নির্গত হবে ?

[1·636 বিইভি]

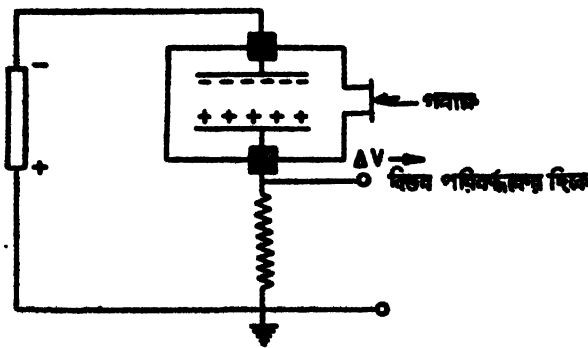
(12) 100 মিলিগ্রাম রেডিয়াম একটি কাঁচের টিউবের ভিতর সীল ক'রে রাখা হয়েছে। কত সময়ে এর ভিতর 1 ঘন মিলিমিটার (NTP) হিলিয়াম গ্যাস উৎপন্ন হবে ? [2·7 মাস]

অষ্টম অধ্যায়

তেজস্ক্রিয় করণের পরিমাপন

পূর্ববর্তী অধ্যায়ে তেজস্ক্রিয় করণের একটি সংক্ষিপ্ত বিবরণ দেওয়া হয়েছে, কিন্তু যেসব যন্ত্রের আয়োজনের সাহায্যে তেজস্ক্রিয় বিকিরণগুলি অনুশীলন করা হয় অর্থাৎ বিকিরিত কণার সংখ্যা গণনা কিংবা শক্তি পরিমাপ করা হয়, সেগুলির সম্বন্ধে কিছুই বলা হয়নি। অর্দ্ধজীবনকাল মাপতে হলে নির্দিষ্ট পরিমাণ তেজস্ক্রিয় পদার্থ থেকে প্রতি সেকেণ্ডে কতগুলি বিস্ফোটন ঘটছে তা জানা দরকার। এরকম প্রতিটি বিস্ফোটন কিভাবে বিশেষ ধরণের যন্ত্রের সাহায্যে গণনা করা যায় সেসম্বন্ধে বর্ত্তমান পরিচ্ছেদে আমরা কিছু আলোচনা করব। নানারকম আয়োজনের সাহায্যে প্রতিটি তেজস্ক্রিয় বিকিরণজাত কণা গণনা করা যায়, এবং শুধু তাই নয়, বাতাস বা অন্যান্য গ্যাস কিংবা তরল পদার্থের ভিতর এইসব কণাগুলির গতিপথের চিত্রও কোন কোন পরীক্ষার আয়োজনের মাধ্যমে লক্ষ্য করা সম্ভব। এছাড়া ঐসকল পদ্ধতিতে কণা এবং গামারশ্মির শক্তিও অত্যন্ত নির্ভুলভাবে নির্দ্ধারণ করা যায়।

আয়নীভবন কক্ষ (Ionisation Chamber)

আমরা জানি যে শক্তিশালী আহিত কণা কিংবা গামারশ্মি পদার্থের ভিতর দিয়ে যাবার সময় আয়নের সৃষ্টি করে, তেজস্ক্রিয় বিকিরণগুলির এই

চিত্র 8·1

আয়নীকরণ ধর্ম্মের সুযোগ নিয়ে এদের পর্য্যবেক্ষণ করার জন্য যন্ত্র তৈরী হয়ে থাকে। এইরকম একটি যান্ত্রিক আয়োজনের ছক 8·1 চিত্রে দেখান হয়েছে,

দুটি পাশাপাশি রাখা বিদ্যুৎধারকের মধ্যে একটি ধনআহিত এবং অপরটি ঋণআহিত, এদের অন্তর্বর্তী স্থানে থাকে বায়ু অথবা আর্গন গ্যাস যা বিদ্যুৎ অপরিবাহী, এজন্য এই চিত্রের বৈদ্যুতিক কুণ্ডলীর ভিতর স্বাভাবিক অবস্থায় কোন বৈদ্যুতিক প্রবাহ থাকে না। এই অবস্থায় পাতদ্বয়ের ভিতর দিয়ে যদি একটি তীব্র শক্তিসম্পন্ন আহিত কণা চলে যায় তবে এর দ্বারা আয়নীভবনের ফলে ধনআহিত আয়ন এবং ইলেকট্রন সৃষ্টি হবে। পাতদুটির মধ্যে কোন বৈদ্যুতিক ক্ষেত্রের অস্তিত্ব না থাকলে আয়ন এবং ইলেকট্রনগুলি পরস্পরের দ্বারা আকর্ষিত হয়ে কিছুক্ষণের মধ্যেই পুনর্মিলিত হবে, কিন্তু তীব্র বৈদ্যুতিক ক্ষেত্রের অস্তিত্ব থাকলে ধন বিদ্যুৎধারকটি ইলেকট্রনগুলিকে টেনে নিয়ে যায় এবং ধনআহিত আয়নগুলি আকৃষ্ট হয়ে ঋণবিভববিশিষ্ট পাতের উপর এসে পড়ে। এইভাবে দুই বিদ্যুৎধারকের ভিতর বিপরীত চিহ্নবিশিষ্ট আধান এসে জমতে থাকায় এদের ভিতর বিভব ব্যবধানের পরিবর্তন ঘটে এবং তার ফলে আয়নীভবন কক্ষের কুণ্ডলীর ভিতর দিয়ে বিদ্যুৎপ্রবাহ শুরু হয়। এই প্রবাহ অবশ্য স্থায়ী হবে ততক্ষণই যতক্ষণ পর্য্যন্ত বিদ্যুৎধারক দুটির মাঝখানে নূতন নূতন আয়নের সৃষ্টি হতে থাকবে। বিদ্যুৎপ্রবাহের পরিমাণ আয়নীভবনের হারের সমান

$$I = Ne$$

N হ'ল আয়নীভবন কক্ষের ভিতর স্পর্শকাতর অঞ্চলে প্রতি সেকেণ্ডে যতগুলি আয়ন উৎপন্ন হচ্ছে তার পরিমাণ। এই বিদ্যুৎপ্রবাহের পরিমাণ সচরাচর খুবই কম হয় এবং একে পর্য্যবেক্ষণ করার জন্য সাধারণতঃ যথেষ্ট বর্দ্ধিতকরণের প্রয়োজন হয়। আয়নীভবন কক্ষ সচরাচর দুইভাবে ব্যবহৃত হয়, কক্ষের ভিতর প্রতি সেকেণ্ডে মোট কত আয়ন সৃষ্টি হচ্ছে তা নির্ণয় করার জন্য অথবা তেজষ্ক্রিয় বিকিরণজাত একটিমাত্র কণা বা গামারশ্মি গণনার যন্ত্র হিসাবে। শেষোক্ত ক্ষেত্রে যে আয়নীভবন বিদ্যুৎপ্রবাহ উৎপন্ন হয় তা একটি খুব বড় প্রতিবন্ধকের মধ্য দিয়ে নিয়ে গিয়ে একটি বড় বিভবব্যত্যয় উৎপন্ন করা হয়, এবং সেটি সাধারণতঃ আরও বর্দ্ধিত ক'রে ইলেকট্রনিক বর্দ্ধনীর সাহায্যে লক্ষ্য করা হয়ে থাকে।

উদাহরণ : একটি $4 \cdot 5$ এমইভি আলফাকণা একটি আয়নীভবন কক্ষের ভিতর এর সমস্ত শক্তি ক্ষয় করে। এর ফলে কত পরিমাণ আয়নীভবন বিদ্যুৎপ্রবাহের সৃষ্টি হবে ?

বাতাসের ভিতর একটি আয়ন জোড়া উৎপন্ন করতে 35·5 ইভি শক্তি ব্যয়িত হয়। সুতরাং মোট উৎপন্ন আয়ন জোড়ার সংখ্যা

$$= 4{\cdot}5 \times 10^{6}/35{\cdot}5 = 1{\cdot}27 \times 10^{5}$$

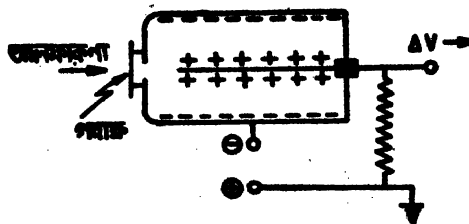
প্রতিটি আয়নের মধ্যে আধানের পরিমাণ $1{\cdot}6 \times 10^{-19}$ কুলম্ব, সুতরাং মোট যত আধান পৃথকীকৃত হয় তা হ'ল

$$1{\cdot}27 \times 10^{5} \times 1{\cdot}6 \times 10^{-19} = 2{\cdot}0 \times 10^{-14} \text{ কুলম্ব।}$$

যদি প্রতি সেকেণ্ডে এরকম একটি ক'রে আলফাকণা কক্ষের ভিতর প্রবেশ করে তাহলে বিদ্যুৎপ্রবাহের পরিমাণ হবে $2{\cdot}0 \times 10^{-14}$ এ্যাম্পিয়ার।

আনুপাতিক গণনকার (Proportional Counter)

একটি সাধারণ আহিত কণার দ্বারা আয়নীকরণের ফলে যে পরিমাণ আয়নীভবন ঘটে তা অতি সামান্য এবং একারণেই আয়নীভবন কক্ষে সৃষ্ট বিভবব্যত্যয়ের পরিমাণ স্বল্প। আয়নীভবন কক্ষের একটি ভিন্নতর আয়োজনে প্রাথমিক আয়নীকরণের দ্বারা সৃষ্ট আয়নের সংখ্যা পুনরায় বর্দ্ধিত করা যায়, তবে শেষ পর্য্যন্ত উৎপন্ন মোট আয়নের সংখ্যা প্রাথমিক আয়নীভবনের সমানুপাতী থাকে। এ অবস্থায় গণনকারটিকে বলা হয় আনুপাতিক গণনকার। 8·2 চিত্রে এরকম একটি আয়নীভবন কক্ষের আয়োজন দেখান হয়েছে। কক্ষের আবরণটি ধাতুর তৈরি, এটি ঋণবিদ্যুৎধারক হিসাবে কাজ করে এবং অভ্যন্তরের সরু তারটি হ'ল এর ধনবিদ্যুৎধারক এবং এদের ভিতর নির্দ্দিষ্ট পরিমাণের বিভব ব্যবধান সৃষ্টি ক'রে রাখা হয়। ধনবিদ্যুৎধারক তারটির ব্যাস খুব কম থাকে ($\sim 0{\cdot}001$ সেমি) এজন্য এর খুব নিকটে বৈদ্যুতিক

চিত্র 8·2

ক্ষেত্রের তীব্রতা অত্যধিক হয়। যদি বিভব ব্যবধানের পরিমাণ যথেষ্ট অধিক থাকে তবে সরু তারটির সন্নিকটে বৈদ্যুতিক ক্ষেত্র এত তীব্র হতে পারে যে এর দ্বারা আকৃষ্ট ইলেকট্রনগুলি ত্বরিত হয়ে যথেষ্ট পরিমাণে শক্তি অর্জন করতে

পারে। তখন এই শক্তিশালী ইলেকট্রনগুলির দ্বারা সংঘর্ষের ফলে আরও বহুসংখ্যক নূতন আয়নের সৃষ্টি হয় এবং এভাবে কক্ষের ভিতর সৃষ্ট আয়নের পরিমাণ বহুগুণ বৃদ্ধি পায়। তবে বিদ্যুৎধারকদ্বয়ের মধ্যে বিভব ব্যবধানের একটা সীমা থাকে যার অধিক না হওয়া পর্যন্ত মোট সৃষ্ট আয়নের পরিমাণ প্রাথমিক আয়নীভবনের সমানুপাতী থাকে। অর্থাৎ যদি Q হয় কক্ষের ভিতর সৃষ্ট মোট আয়নের সংখ্যা এবং q, বহিরাগত বিকিরণের দ্বারা সৃষ্ট প্রাথমিক আয়নের সংখ্যা, তবে

$$Q = Mq \qquad \cdots \qquad 8.1$$

M, একটি ধ্রুবক যা প্রাথমিক আয়নীভবনের পরিমাণ নিরপেক্ষ কিন্তু বিদ্যুৎধারকদ্বয়ের বিভব ব্যবধানের উপর নির্ভরশীল। M-এর পরিমাণ 1 থেকে 10^6 পর্যন্ত হতে পারে, বিভব ব্যবধান বৃদ্ধির সাথে সাথে M-এর পরিমাণ দ্রুত বৃদ্ধি পেতে থাকে। যেহেতু প্রান্তিক আয়নীভবনের পরিমাণ প্রাথমিক আয়নীভবনের তুলনায় বহুগুণ বেশী হয়, এই গণনকারের ভিতর খুব বড় বিভবব্যত্যয় উৎপন্ন হয় এবং একে অপেক্ষাকৃত সহজেই পর্যবেক্ষণ করা যায়। ধরা যাক $M = 10^4$, সুতরাং একটি আলফাকণা যা কক্ষটির ভিতর 10^5 সংখ্যক প্রাথমিক আয়ন সৃষ্টি করে, এর গমনের ফলে 10^9 সংখ্যক আয়নের একটি বিভবব্যত্যয় উৎপন্ন হবে। একটি বিটাকণা যদি 10^2 সংখ্যক প্রাথমিক আয়ন সৃষ্টি করে, এর দ্বারা যে বিভবব্যত্যয় উৎপন্ন হবে, তা হ'ল 10^6 সংখ্যক আয়নের। এইপ্রকার বৃহৎ ব্যত্যয়গুলি অপেক্ষাকৃত সহজে পর্যবেক্ষণ করা যায়।

একই শক্তিতে আয়নীভবনের পরিমাণ নির্ভর করে আহিত কণার আধানের উপর, আধান যে কণার যত বেশী তার দ্বারা সৃষ্ট আয়নীভবনের পরিমাণও সেই তুলনায় অধিক, এই কারণে সমশক্তিসম্পন্ন ইলেকট্রনের আয়নীকরণ ক্ষমতা আলফাকণার তুলনায় অনেক কম। গামারশ্মি কম্পটন প্রক্রিয়া কিংবা আলোকবিদ্যুত প্রক্রিয়ার দ্বারা শক্তিশালী ইলেকট্রন উৎপাদন করে এবং ঐ ইলেকট্রনগুলি পুনরায় বহুসংখ্যক আয়নের সৃষ্টি করতে পারে, এইভাবে গামারশ্মির দ্বারা আয়নীভবন সম্ভব হয়। কিন্তু আহিত কণাদের তুলনায় গামারশ্মির দ্বারা সৃষ্ট আয়নীভবনের পরিমাণ সাধারণতঃ অনেক কম হয়। আনুপাতিক গণনকারের ভিতর সমশক্তির ইলেকট্রন অথবা আলফা কণাকে পৃথক পৃথক কণা হিসাবে লক্ষ্য করা সম্ভব যেহেতু এদের দ্বারা সৃষ্ট আয়নীভবনের পরিমাণের ভিতর বিপুল পার্থক্য লক্ষিত হয়।

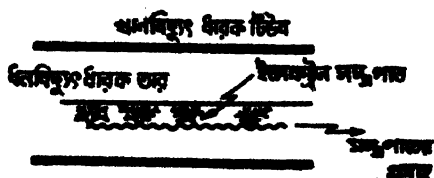
তার প্রত্যেক প্রকার গণনকারের সঙ্গেই কোন না কোন ধরনের ইলেকট্রনিক বর্ত্তনীর আয়োজন যুক্ত থাকে। বিশেষ ধরণের ইলেকট্রনিক আয়োজনের দ্বারা এমন ব্যবস্থা করা সম্ভব যাতে যেসমস্ত ব্যত্যয়গুলির বিস্তার কোন বিশেষ পরিমাণের অধিক সেগুলিই শুধু গণ্য হবে। এই ধরণের বর্ত্তনীতে এমন আয়োজন করা সম্ভব যাতে যেসব ব্যত্যয়গুলি 10^5 আয়নের চেয়ে অধিক আধান ধারণ করে সেগুলিই শুধু গণ্য হবে, এইপ্রকার আয়োজনের দ্বারা গণনকারটি বিটা এবং গামারশ্মির পশ্চাদ্ভূমি থেকে বেছে বেছে শুধু আলোকণাগুলিকেই গণনা করতে পারে।

সাধারণতঃ আর্গন গ্যাসপূর্ণ একটি সিলিণ্ডার আকৃতির গণনকারের ক্ষেত্রে 100 ভোল্ট থেকে শুরু করে 300~400 ভোল্ট পর্য্যন্ত ভিতর ব্যবধান প্রয়োগ করলে আয়নীভবন কক্ষের কাজ চলতে পারে, অর্থাৎ ঐ পরিমাণ বিভবের জন্য প্রাথমিক আয়নীভবনের কোন বর্দ্ধিতকরণ ঘটে না। তারপর 500 থেকে 800 ভোল্ট বিভব প্রয়োগ করলে এটাকে আনুপাতিক গণনকার হিসাবে ব্যবহার করা যায়, কারণ সে অবস্থায় যে বর্দ্ধিতকরণ ঘটে তা প্রাথমিক আয়নীভবনের সমানুপাতী থাকে। M-এর পরিমাণ বিভব ব্যবধানের উপর অত্যন্ত নির্ভরশীল, যাতে কক্ষের ভিতর বিভবের হ্রাসবৃদ্ধি না ঘটতে পারে এজন্য বিদ্যুৎ সরবরাহ নিয়ন্ত্রণ করার জন্য স্টেবিলাইজার (stabilizer) বর্ত্তনীর ব্যবহার বাঞ্ছনীয়। আয়নীভবন কক্ষ কিংবা আনুপাতিক গণনকারের বিশ্লিষ্টকরণ ক্ষমতা যথেষ্ট বেশী, একটি কণা চলে যাবার মাত্র 10^{-6} সেকেণ্ড পর অপর একটি কণা এলেও এদুটি পৃথক পৃথক কণা হিসাবে ধরা পড়বে।

গাইগার মুলার গণনকার (Geiger Muller Counter)

বিদ্যুৎধারকদ্বয়ের মধ্যে বিভব ব্যবধান বাড়াতে বাড়াতে একসময় এমন অবস্থায় এসে পৌঁছান যায় যখন প্রান্তিক আয়নীভবন প্রাথমিক আয়নীভবনের সঙ্গে আর সমানুপাতী থাকে না, প্রাথমিক আয়নীভবন যাই হোক না কেন, এর ফলে সৃষ্ট বিভবব্যত্যয় বহুগুণ বর্দ্ধিত হয়ে থাকে এবং যেকোন কণাই তখন গণনকারের ভিতর সমান আকারের বৃহৎ ব্যত্যয় সৃষ্টি করে, এই পরিস্থিতিতে গণনকারটিকে বলা হয় গাইগার মুলার কক্ষ। পূর্ব্বোক্ত আর্গন গ্যাসপূর্ণ গণনকারের ভিতর 800~900 ভোল্ট বিভব ব্যবধানে বা তদূর্দ্ধে এইপ্রকার গাইগার মুলার অঞ্চল সৃষ্টি হয়। ঐ অবস্থায় কক্ষের ভিতর কোন আয়নীভবন ঘটলে অতঃপর ধাপে ধাপে, অর্থাৎ প্রথমবার সৃষ্ট ইলেকট্রনগুলির দ্বারা দ্বিতীয়বার, দ্বিতীয়বার সৃষ্ট ইলেকট্রনগুলির দ্বারা তৃতীয়বার, এইভাবে

আয়নীভবনের পরিমাণ দ্রুত বৃদ্ধি পেতে থাকে। প্রক্রিয়াটিকে বলা হয় আয়নীভবন সম্প্রপাত। এই প্রক্রিয়াটি অবশ্য ধনবিদ্যুৎধারক তারটির খুব নিকটেই ঘটে। ইলেকট্রন সংঘর্ষের দ্বারা উত্তেজিত পরমাণুগুলির বিকিরণের দ্বারা কিছু বেগুনীপারের আলোককণাও উৎপন্ন হয় এবং এই আলোককণাগুলি আলোকবৈদ্যুতিক প্রক্রিয়ার দ্বারা শোষিত হয়ে নূতন আয়নীভবনের সৃষ্টি করতে পারে। যখন বিভব ব্যবধান খুবই বেশী হয় তখন একটি সম্প্রপাত প্রক্রিয়া থেকে উৎপন্ন আলোককণার দ্বারা কিছু দূরে অপর একটি অঞ্চলে অপর একটি সম্প্রপাত সৃষ্টি প্রায় অবশ্যম্ভাবী হয়ে পড়ে, এইভাবে সম্প্রপাত প্রক্রিয়াটি গাইগার মূলার কক্ষে ধনবিদ্যুৎধারক তারটির সমগ্র দৈর্ঘ্য বরাবর ছড়িয়ে পড়ে। কক্ষটির ভিতর এ্যালকোহল বাষ্প প্রবেশ করান থাকে, এই বাষ্প বেগুনীপারের আলোককণাগুলিকে দ্রুত শোষণ করে যায় ফলে এগুলি কক্ষের মধ্যে অতিরিক্ত দূরত্বে ছড়িয়ে পড়ার সুযোগ পায় না, সাধারণতঃ গতিপথের এক মিলিমিটারের মধ্যেই এগুলি শোষিত হয়ে যায়। এজন্য সম্প্রপাত প্রক্রিয়াটি একবার কেন্দ্রীয় তারটির খুব সন্নিকটে এক জায়গায় সৃষ্টি হলে তারপর ক্রমশঃ নির্দিষ্ট গতিবেগে সমগ্র তারের দৈর্ঘ্য বরাবর ছড়িয়ে পড়তে থাকে, এই গতিবেগ হয় প্রতি সেকেণ্ডে প্রায় 10^7 সেমি। সম্প্রপাতটি কিভাবে ছড়িয়ে পড়তে থাকে তা একটি ছক এঁকে 8·3 চিত্রে বোঝান হয়েছে। স্পষ্টতঃই এভাবে যে বিভবব্যত্যয় উৎপন্ন

চিত্র 8·3

ধনবিদ্যুৎধারকের নিকট ইলেকট্রন সম্প্রপাত; কেন্দ্রীয় তারটির খুব নিকটেই বৈদ্যুতিক ক্ষেত্রের পরিবর্তনের হার সর্বাধিক হয় এজন্য সম্প্রপাত প্রক্রিয়া শুধু ঐ অঞ্চলেই সীমাবদ্ধ থাকে।

হয় তার সঙ্গে প্রাথমিক আয়নীভবনের কোন সম্পর্ক থাকে না। যেসব বিকিরণ খুব সামান্য পরিমাণ আয়নীভবন সৃষ্টি করে যেমন গামারশ্মি, এদের পর্যবেক্ষণের জন্য গাইগার মূলার গণনকার বিশেষ উপযোগী, তবে এই যন্ত্রের সাহায্যে কণার প্রাথমিক শক্তির বিষয় কিছু জানা যায় না। একটি কণার অনুপ্রবেশের পর গণনকার বর্তনীতে যে বিদ্যুৎপ্রবাহ উৎপন্ন হয় তার দ্বারা একটি লাউডস্পীকারের মধ্যে শব্দ উৎপন্ন করা যায় এবং তাথেকে ঘটনাটি গণ্য হয়। গাইগার মূলার গণনকার থেকে উৎপন্ন বিভবব্যত্যয় এত বৃহৎ হয় যে এর কোন বর্ধিতকরণের

প্রয়োজন হয় না, এজন্য এই গণনকারের যান্ত্রিক আয়োজন অপেক্ষাকৃত সরল হয় এবং খুব সহজেই ব্যবহার করা যায় ব'লে এটির ব্যাপক ব্যবহার হয়ে থাকে।

গাইগার মূলার গণনকার একটি অত্যন্ত স্পর্শকাতর যন্ত্র, কোন কারণে এর ভিতর সামান্য কিছু আয়নের সৃষ্টি হলেই এটি একটি বৃহৎ বিভবব্যত্যয় উৎপন্ন করবে। একটি অনুপ্রবেশের পর ধনবিদ্যুৎধারক তারটির খুব নিকটে সম্প্রপাত প্রক্রিয়ার দ্বারা বহুসংখ্যক ধনআহিত আয়ন ও ইলেকট্রন উৎপন্ন হয়। ইলেকট্রনের ভর খুব কম এজন্য এদের গতিবেগ অনেক বেশী। এরা অতিদ্রুত ধনবিদ্যুৎধারকটির দ্বারা সংগৃহীত হয়, 10^{-6} সেকেণ্ডের কম সময়ের মধ্যেই এগুলি সংগৃহীত হয়ে যায়। ধনআহিত আয়নগুলির ভর অপেক্ষাকৃত অনেক বেশী এবং এজন্য গতিবেগ অনেক কম, এগুলি ধীরে ধীরে ঋণবিদ্যুৎধারকের দিকে অর্থাৎ কক্ষের দেওয়ালের দিকে অগ্রসর হতে থাকে, ঐখানে গিয়ে সংগৃহীত হতে সময় লাগে প্রায় 10^{-4} সেকেণ্ড। যখন ইলেকট্রনগুলি সমস্তই কেন্দ্রীয় তারটির ভিতর সংগৃহীত হয়ে গিয়েছে তখনও পর্য্যন্ত ধনআহিত আয়নের সমাবেশ ঐ তারটির যথেষ্ট নিকটেই অবস্থান করে এবং এদের উপস্থিতির ফলে ঐ অঞ্চলে বৈদ্যুতিক ক্ষেত্রের তীব্রতা বহুল পরিমাণে হ্রাস পায়। আয়নগুলি বৈদ্যুতিক ক্ষেত্রের প্রভাবে ক্রমশঃ কক্ষের দেওয়ালের দিকে সরে যেতে থাকে কিন্তু যতক্ষণ পর্য্যন্ত না এরা তারের নিকট থেকে যথেষ্ট দূরে চলে যায় ততক্ষণ পর্য্যন্ত এটির নিকটে পুনরায় তীব্র বৈদ্যুতিক ক্ষেত্র সৃষ্টি হতে পারে না। সেই সময় কক্ষের ভিতর যদি পুনরায় কোন অনুপ্রবেশ ঘটে তবে নূতন সৃষ্ট ইলেকট্রনগুলির বিশেষ কোন ত্বরণ ঘটে না এবং এজন্য তখন ঐ নূতন অনুপ্রবেশটি আর গণ্য হবে না। আনুপাতিক গণনকারের ভিতর সমগ্র তারের উপর ইলেকট্রন সম্প্রপাত ঘটে না, তা শুধু কোন একটি বিশেষ অঞ্চলে সীমাবদ্ধ থাকে এবং ধনআহিত আয়নগুলিও ঐ অঞ্চলেই ভিড় করে। এর দ্বারা তারের ঐ অঞ্চলের স্পর্শকাতরতা সামান্য সময়ের জন্য লোপ পেলেও অন্যান্য অঞ্চলগুলি স্পর্শকাতর থাকে এবং ঐ অঞ্চলগুলি তখন নবাগত কণার পর্য্যবেক্ষণের জন্য ব্যবহৃত হতে পারে। এই কারণে আনুপাতিক গণনকারের বিশ্লিষ্টকরণ সময় গাইগার মূলার গণনকারের তুলনায় অনেক কম।

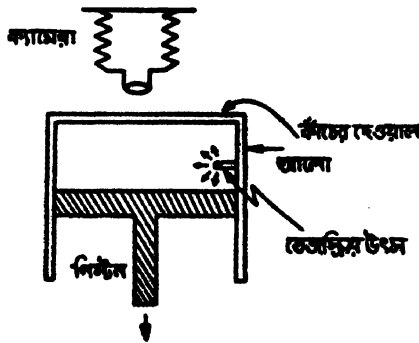
অধিকাংশ গাইগার মূলার গণনকারের মধ্যেই আর্গন গ্যাস ও এ্যালকোহল বাষ্পের মিশ্রণ ব্যবহৃত হয়। সম্প্রপাতের ফলে আর্গন ও ইথাইল এ্যালকোহল উভয়েরই আয়ন উৎপন্ন হয়, কিন্তু আর্গনের আয়নীভবন বিভব এ্যালকোহলের তুলনায় অধিক হওয়ায় এ্যালকোহল অণুর সঙ্গে সংঘর্ষে আর্গন আয়নটি নিরপেক্ষ পরমাণুতে পরিণত হতে পারে এবং ঐ অণুটি পরিণত হতে

পারে একটি আয়নে। এই প্রক্রিয়া সহজেই ঘটতে পারে এজন্য শেষ পর্য্যন্ত যে আয়নগুলি ঋণবিদ্যুৎধারক দেওয়ালের উপর এসে উপনীত হয় সেগুলি সমস্তই হয় এ্যালকোহল অণুর আয়ন। দেওয়ালের সঙ্গে আঘাত ক'রে এগুলি এক একটি ইলেকট্রন সংগ্রহ ক'রে আধানবিহীন অণুতে পরিণত হয়। কিন্তু এভাবে উৎপন্ন নিরপেক্ষ অণুগুলি সাধারণতঃ উত্তেজিত অবস্থায় থাকে এবং তখন এগুলি থেকে বেগুনীপারের আলোককণা উৎপন্ন হতে পারে। এই আলোককণা পরে আলোকবিদ্যুৎ-প্রক্রিয়ার দ্বারা পুনরায় একটি ইলেকট্রন উৎপন্ন করলে তার প্রভাবে গণনকারের ভিতর আবার একটি বিভবব্যত্যয় সৃষ্টি হবে। কিন্তু ইথাইল এ্যালকোহল অণুর ক্ষেত্রে এটি এর উত্তেজনা শক্তি আলোককণা হিসাবে বিকিরণ করে না, বরঞ্চ তার প্রভাবে অণুটি ভেঙে গিয়ে বিভিন্ন পরমাণুতে বিশ্লিষ্ট হয়ে যায় এবং এই প্রক্রিয়ার শেষ পর্য্যন্ত কোন আয়নীভবন ঘটে না। সুতরাং এ্যালকোহল বাষ্পের উপস্থিতি পুনরায় আয়নীভবনের সম্ভাবনাকে রোধ করে। কিন্তু কক্ষের ভিতর অত্যাধিক বিভব প্রয়োগ করলে শেষ পর্য্যন্ত আর্গন আয়নগুলিও অধিক সংখ্যায় কক্ষের দেওয়ালের উপর আঘাত ক'রে আধানবিহীন পরমাণুতে পরিণত হতে থাকে; তখন এভাবে সৃষ্ট উত্তেজিত আর্গন পরমাণুর বেগুনীপারের বিকিরণের ফলে কক্ষটির ভিতর নূতন নূতন ব্যত্যয় (pulse) সৃষ্টি হতে থাকে। অর্থাৎ এই অবস্থায় কক্ষটির মধ্যে অনবরত বিদ্যুৎমোক্ষণ ঘটতে থাকবে।

গাইগার মূলার গণনকারের যান্ত্রিক আয়োজন অপেক্ষাকৃত সরল হওয়ায় এটি অপেক্ষাকৃত ছোট আকারে নির্মাণ করা যায় এবং সর্ব্বত্র বহন করা চলে। গবেষণাগারের বাইরে আয়নীভবন ও তেজষ্ক্রিয়তা অনুসন্ধানের জন্য এটির ব্যাপক ব্যবহার প্রচলিত।

মেঘকক্ষ (Cloud Chamber)

আয়নীভবন কক্ষ কিংবা গাইগার মূলার গণনকারের মত মেঘকক্ষ হ'ল শক্তিশালী আহিত কণা পর্য্যবেক্ষণের একটি যন্ত্র, তবে এর বৈশিষ্ট্য হ'ল এই যে এর সাহায্যে একটি শক্তিশালী দ্রুতগতি কণার সমগ্র গতিপথটির ফটো তোলা যায়। এই কারণে মেঘকক্ষ আয়নীভবন কক্ষের তুলনায় কোন কোন ক্ষেত্রে অনেক বেশী উপযোগী কারণ কণাটির গতিপথ পর্য্যবেক্ষণ ক'রে তাথেকে এর আধান, ভর এবং শক্তি সম্বন্ধে অনেক বিস্তৃততর জ্ঞান অর্জ্জন করা সম্ভব। মেঘকক্ষের সহায়তায় মহাজাগতিক রশ্মির উপর পরীক্ষা ক'রে অনেক নূতন নূতন কণা আবিষ্কৃত হয়েছে যা শুধুমাত্র আয়নীভবন কক্ষ বা গাইগার মূলার গণনকারের সাহায্যে সম্ভব হ'ত না।

আয়নীভবন কক্ষের মত মেঘকক্ষেও কণার পর্য্যবেক্ষণ নির্ভর করে এর আয়নীকরণ ক্ষমতার উপর। মেঘকক্ষ প্রথম নির্ম্মাণ করেন সি. টি. আর. উইলসন, তিনি যে নীতির উপর ভিত্তি ক'রে এটি প্রস্তুত করেন তা হ'ল এই যে, অতিপরিপৃক্ত জলবাষ্পের ভিতর কোন আয়নের উপস্থিতি থাকলে সেই আয়নের উপর বাষ্প জমে উঠতে থাকে এবং এইভাবে আয়নগুলিকে কেন্দ্র ক'রে ক্ষুদ্র ক্ষুদ্র জলবিন্দুর সৃষ্টি হয়। যতক্ষণ পর্য্যন্ত অতিপরিপৃক্ত অবস্থা বিদ্যমান থাকে ততক্ষণ পর্য্যন্ত বাষ্প জমতে থাকে এবং জলবিন্দুগুলির আকার ক্রমশঃ বৃদ্ধি পায়। আমরা জানি যে একটি বদ্ধপাত্রে যখন জল ও জলবাষ্প পরস্পরের সংস্পর্শে থাকে তখন নির্দ্দিষ্ট তাপমাত্রায় ঐ জলবাষ্পের একটি নির্দ্দিষ্ট চাপ থাকবে, একে বলা হয় পরিপৃক্ত বাষ্পীয় চাপ। এখন যদি তাপ-বিনিময়হীনরূপে পাত্রের অভ্যন্তরের তাপমাত্রা কোনভাবে হঠাৎ কমিয়ে দেওয়া যায় তাহলে সেখানে বাষ্প অতিপরিপৃক্ত হয়ে পড়বে, অর্থাৎ নির্দ্দিষ্ট তাপমাত্রায় যতটা বাষ্পচাপ হওয়া সম্ভব চাপের পরিমাণ তার তুলনায় হয়ে পড়বে বেশী। 8·4 চিত্রে মেঘকক্ষের আয়োজনের একটি চিত্র দেখান হয়েছে, কক্ষটি হ'ল একটি কাঁচের সিলিণ্ডার এবং এর মধ্যে একটি গবাক্ষের ভিতর দিয়ে কণাগুলি মেঘকক্ষের ভিতর আনা হয়, তেজস্ক্রিয় উৎসটি মেঘকক্ষের অভ্যন্তরেও থাকতে পারে। একটি পিস্টন সিলিণ্ডারটির সঙ্গে বায়ুসংযোগবিবর্জ্জিত উপায়ে আটকান

চিত্র 8·4 : মেঘকক্ষের আয়োজন।

থাকে। সিলিণ্ডারটির ভিতর সামান্য পরিমাণে জল অথবা জল ও এ্যালকোহলের মিশ্রণ থাকে, এটি বাইরের সঙ্গে বায়ুসংযোগবিবর্জ্জিত সুতরাং এর ভিতর বাষ্প পরিপৃক্ত অবস্থায় থাকে। যদি সহসা পিস্টনটিকে টেনে নামান হয় তাহলে ভিতরের গ্যাস তাপবিনিময়হীনরূপে (adiabatic) সম্প্রসারিত হয় এবং এর ফলে তাপমাত্রা অতর্কিতে হ্রাস পায়। এই অবস্থায় খুব অল্প

সময়ের জন্য মেঘকক্ষের ভিতর বাষ্পের চাপ ঐ নূতন অবনমিত তাপমাত্রায় পরিপৃক্ত জলবাষ্পের চাপের তুলনায় অধিক থাকে এবং এইভাবেই অতিপরিপৃক্ত অবস্থার সৃষ্টি হয়। এইরকম অতিপরিপৃক্ত অবস্থায় (Supersaturated) যদি মেঘকক্ষের অভ্যন্তরে কিছু আয়নের উপস্থিতি থাকে তাহলে সেই আয়নগুলির উপর অতিপরিপৃক্ত বাষ্প জমে গিয়ে জলবিন্দুর সৃষ্টি করবে। একটি আহিতকণার সমগ্র গতিপথের উপরই আয়ন সৃষ্টি হয়, সুতরাং এভাবে সমগ্র গতিপথ বরাবর বহুসংখ্যক জলবিন্দুর সৃষ্টি হবে। মেঘকক্ষের কাঁচের দেওয়ালের ভিতর দিয়ে আলোকসম্পাতের ব্যবস্থা থাকে এবং একই সঙ্গে দুই বিভিন্ন দিক থেকে গতিপথের ফটো তোলা হয় যাতে গতিপথের ত্রিমাত্রিক চিত্রটি গঠন করা যায়। ছবি তোলার জন্য খুব তীব্র আলোকসম্পাতের প্রয়োজন কারণ ফটো ওঠে বিচ্ছুরিত আলোর দ্বারা আর ঐসব বিচ্ছুরক জলবিন্দুগুলির আকার খুবই ক্ষুদ্র, এদের ব্যাস হয় মাত্র 10^{-3} সেমির নিকটবর্তী। অতিপরিপৃক্ত অবস্থা স্থায়ী হয় অতি সামান্য সময়ের জন্য, সাধারণতঃ মাত্র 1/10 সেকেণ্ড, এবং এই সময়টুকুর মধ্যেই ছবি তোলার কাজও শেষ ক'রে ফেলতে হবে কারণ অতিপরিপৃক্ত অবস্থার অবসান হবার সঙ্গে সঙ্গেই জলকণাগুলিও অন্তর্হিত হয়ে যায়।

আলফাকণার আয়নীকরণ যেহেতু খুব বেশী, এর গতিপথের চিত্র একটা স্থূল সরলরেখার মত, শুধু পথের প্রান্তে এসে গতিপথটি ইতস্ততঃ বেঁকে যায়। এরকম হয় তার কারণ গতিপথের প্রান্তে এসে আলফাকণার শক্তি খুবই হ্রাস পায় এজন্য বিভিন্ন অণুগুলির সঙ্গে সংঘর্ষে এগুলি সহজেই বিক্ষিপ্ত হয়ে যেতে পারে। বিটাকণা অর্থাৎ ইলেকট্রনের গতিপথ হয় অত্যন্ত সরু কারণ এদের দ্বারা আয়নীভবনের পরিমাণ খুব কম। এদের ভর খুব সামান্য ব'লে অণুগুলির সঙ্গে সংঘর্ষে এরা সহজেই বিক্ষিপ্ত হয়, ফলে এদের গতিপথ হয় আঁকাবাঁকা। তবে বিটাকণার গমনপথের দৈর্ঘ্য সমশক্তির আলফাকণার তুলনায় অনেক বেশী হয়। এই পার্থক্যগুলি থাকার জন্য আলফা ও বিটা কণার গতিপথ পরস্পরের থেকে অতি সহজেই পৃথক ক'রে চেনা যায়। গতিপথের উপর জমে ওঠা জলবিন্দুগুলির ঘনত্ব পরিমাপ ক'রে কণাটির আধানের পরিমাণ নির্ধারণ করা সম্ভব।

মেঘকক্ষের ভিতর চৌম্বকক্ষেত্র প্রয়োগ ক'রে আহিত কণাগুলিকে বাঁকান সম্ভব, কোন্ কণা চৌম্বকক্ষেত্রে কোন্ দিকে বাঁকে তা লক্ষ্য ক'রে এর আধান কি প্রকারের তা জানা যায়। গতিপথের বক্রতার ব্যাসার্ধ ও চৌম্বকক্ষেত্রের

দৈর্ঘ্যের পরিমাণ জেনে কণাটির ভরবেগ মাপা হয়। তাছাড়া গতিপথের দৈর্ঘ্য, বিভিন্ন বিন্দুতে আয়নীভবন ঘনত্ব এবং কণাটির ভর, গতিবেগ ইত্যাদির মধ্যে সহজ পারস্পরিক সম্বন্ধ রয়েছে, বিভিন্ন ক্ষেত্রে এগুলি প্রয়োগ ক'রে মেঘকক্ষের ছবিতে অনেক নূতন নূতন কণার অস্তিত্ব সম্বন্ধে নিঃসংশয় হওয়া সম্ভব হয়েছে, এইরকম কিছু কিছু পরীক্ষার বিষয় পরে আলোচনা করা হবে।

বুদ্বুদকক্ষ (Bubble Chamber)

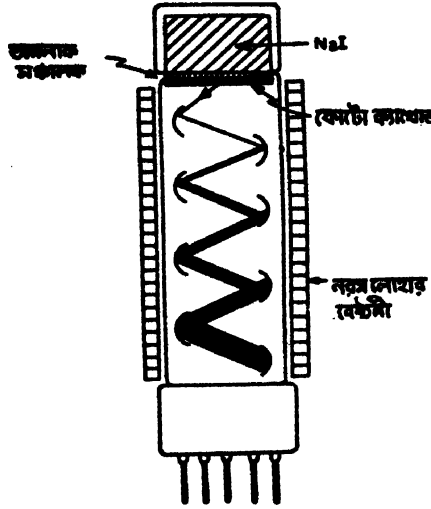
মেঘকক্ষের একটি অসুবিধা হ'ল যে বাষ্পের ঘনত্ব খুবই কম এজন্য অনেকসময় একটি শক্তিশালী কণা বিশেষ শক্তি ক্ষয় না ক'রেই কক্ষটি অতিক্রম ক'রে চলে যেতে পারে। সেক্ষেত্রে কণাটির সমগ্র গতিপথের ছবি তোলা সম্ভব হয় না এবং এজন্য কণাটির প্রকৃতি নিরূপণে অনেক সময় বিশেষ অসুবিধার সৃষ্টি হয়। অধুনা বুদ্বুদকক্ষের প্রচলনে এই অসুবিধা অনেকটা দূর হয়েছে। বুদ্বুদকক্ষ ও মেঘকক্ষের কার্য্যপদ্ধতির মধ্যে বহু সাদৃশ্য আছে, মেঘকক্ষে ব্যবহার করা হয় অতিপরিপৃক্ত বাষ্প, বুদ্বুদকক্ষে ব্যবহার করা হয় অতি উত্তপ্ত তরল। অতি উত্তপ্ত বলতে বোঝায় এমন তরল যাকে এর স্ফুটনাঙ্কের চেয়ে অধিক তাপমাত্রায় উত্তপ্ত করা হয়েছে অথচ এর তরলাবস্থা বর্ত্তমান আছে। নির্দ্দিষ্ট চাপে কোন তরলের স্ফুটনাঙ্ক নির্দ্দিষ্ট, চাপের সঙ্গে সঙ্গে স্ফুটনাঙ্ক বৃদ্ধি পায়। উদাহরণ হিসাবে তরল হাইড্রোজেনের কথা উল্লেখ করা যায়, এক বায়ুমণ্ডলীর চাপে তরল হাইড্রোজেনের স্ফুটনাঙ্ক 20°K এবং পাঁচ বায়ুমণ্ডলীয় চাপে স্ফুটনাঙ্ক 27°K। এবার যদি তরল হাইড্রোজেনের তাপমাত্রা 27°K-তে থাকাকালীন এর চাপ অতর্কিতে পাঁচ বায়ুমণ্ডল থেকে এক বায়ুমণ্ডলে, অথবা ছয় বায়ুমণ্ডল থেকে দুই বায়ুমণ্ডলে কমিয়ে আনা যায় তাহলে তরল হাইড্রোজেন অতি উত্তপ্ত হয়ে পড়বে। স্ফুটন আরম্ভ হবার আগে অতি উত্তপ্ত তরলাবস্থা এক সেকেণ্ডের ক্ষুদ্র ভগ্নাংশকাল স্থায়ী থাকে; ঐ সময়ের ভিতর যদি বুদ্বুদকক্ষের মধ্যে কিছু আয়ন উপস্থিত থাকে তবে সেগুলির উপর বুদ্বুদ গড়ে উঠতে থাকে, এইভাবে কোন আহিত কণার দ্বারা সৃষ্ট আয়নগুলির উপর বুদ্বুদ গড়ে উঠতে থাকলে সেগুলির প্রভাবে সমগ্র গতিপথটি ফটোর ভিতর দৃষ্টিগোচর হয়। যতক্ষণ পর্য্যন্ত অতি উত্তপ্ত তরলাবস্থা বর্ত্তমান থাকে ততক্ষণ বুদ্বুদগুলির আকার ক্রমাগত বৃদ্ধি পেতে থাকে। মেঘকক্ষের ছবি থেকে যেভাবে গতিপথগুলির প্রকৃতি বিশ্লেষণ ক'রে কণাদের সম্বন্ধে জানা যায় ঠিক ঐ একই পদ্ধতি বুদ্বুদকক্ষের ক্ষেত্রেও প্রয়োগ করা হয়। তবে

বুদ্‌বুদকক্ষ খুব বড় আকারে নির্মাণ করা যায় এবং যেহেতু তরলের ঘনত্ব বাষ্পের তুলনায় বহুগুণ বেশী, খুব শক্তিশালী কণাও বুদ্‌বুদকক্ষের ভিতর এর গতি নিঃশেষিত ক'রে ফ্যালে, এজন্য এদের সম্বন্ধে জানবার সুযোগ এখানে অনেক বেশী। আধুনিককালে অত্যন্ত শক্তিশালী ত্বরণযন্ত্রের সাহায্যে প্রোটন, পাইমেসন ইত্যাদি কণাগুলিকে কয়েক বিইভি শক্তিতে উৎপন্ন করা যায়। এইসব শক্তির পরিমাণ এত বেশী যে বৃহত্তম মেঘকক্ষের ভিতরও ঐ কণাগুলির গতিপথ নিঃশেষিত হবে না, কিংবা সর্বোচ্চ তীব্রতা বিশিষ্ট চৌম্বক-ক্ষেত্রের সাহায্যেও বায়ুতে বা বাষ্পের ভিতর স্বল্প পরিসরে এদের যথেষ্ট বাঁকান সম্ভব হবে না, এদের ক্ষেত্রে বুদ্‌বুদকক্ষ অপরিহার্য্য। অধিকাংশ বুদ্‌বুদকক্ষেই তরল হাইড্রোজেন ব্যবহার করা হয় সুতরাং এদের মধ্যে প্রোটনের সঙ্গে বিভিন্ন শক্তিশালী কণার পরিক্রিয়া পর্য্যবেক্ষণ করা যায়, কোন কোন আধুনিক বুদ্‌বুদকক্ষের ব্যাস 6 ফুট। অতি শক্তিশালী কণাদের বিচ্ছুরণ ও বিক্রিয়া লক্ষ্য করার জন্য বর্ত্তমানে পরীক্ষামূলক গবেষণায় এটি খুব বেশী ব্যবহৃত হয়।

চমক গণনকার (Scintillation Counter)

কিছু কিছু পদার্থ আছে যাদের উপর তেজস্ক্রিয় বিকিরণ কিংবা রঞ্জনরশ্মি আপতিত হলে আলো উৎপন্ন হয়, এই প্রক্রিয়ার নাম দেওয়া হয়েছে চমক বা ক্ষণদীপন। তেজস্ক্রিয় বিকিরণজাত কণাগুলি ঐসব পদার্থের ইলেকট্রনের স্তরগুলিকে উত্তেজিত করে, তার ফলেই এই আলো উৎপন্ন হয়। প্রতিটি আপতিত কণা বা গামারশ্মির জন্য এক একটি চমকের সৃষ্টি হয় এবং এইগুলি গণনা ক'রে আপতিত কণার সংখ্যা গণনা করা যায়। চমক প্রক্রিয়ার সাহায্য নিয়ে একরকম গণনকার নির্মিত হয়েছে যাদের বলা হয় চমক গণনকার। তেজস্ক্রিয়তার গবেষণায় চমকের ব্যবহার অতি প্রাচীন, রাদারফোর্ড এবং তাঁর সহকর্মিবৃন্দ চমক সৃষ্টিকারী জিঙ্ক সালফাইড মাখান পর্দা আলফাকণা গণনা করার জন্য ব্যবহার করেছেন। তাঁদের সময় একটি অন্ধকার প্রকোষ্ঠের ভিতর অণুবীক্ষণের দ্বারা লক্ষ্য ক'রে চমকের সংখ্যা গণনা করা হ'ত। বর্ত্তমানে অবশ্য বৈদ্যুতিক আয়োজনের দ্বারা এই কাজ সম্পন্ন হয়। চমকের ফলে যে আলো উৎপন্ন হয় তা একটি ফোটো-ক্যাথোডের উপর প'ড়ে তাথেকে আলোকবিদ্যুৎপ্রক্রিয়ার সাহায্যে ইলেকট্রন উৎপন্ন করে, এই ইলেকট্রনগুলি পুনরায় কিছু বিভব-ব্যবধানের মাধ্যমে ত্বরিত ক'রে অন্য একটি ধাতুর পাতের উপর এনে ফেলা হয়, সেখানে এগুলি আরও অধিক সংখ্যায় ইলেকট্রন উৎপন্ন করে এবং এইভাবে কয়েক চক্র চলার

পরে অবশেষে ইলেকট্রনের সংখ্যা বহুগুণ বৃদ্ধি পায় এবং শেষ পর্য্যন্ত এরা একত্র সংগৃহীত হয়ে একটি বড় বিভববিভ্যয় উৎপন্ন করতে পারে। এই আয়োজনকে বলা হয় ইলেকট্রন বর্দ্ধক নল, 8·5 চিত্রে এর একটি ছক দেখান হয়েছে।

একটি নলের ভিতর পাশাপাশি কতগুলি ধাতুর প্লেট বসান আছে, এই প্লেটগুলিকে বলা হয় ফোটোক্যাথোড। প্রত্যেকটি প্লেট এর পূর্ব্ববর্ত্তীটির চেয়ে অপেক্ষাকৃত উচ্চ বিভবে থাকে। প্লেটগুলি বিশেষ আকারে বাঁকান থাকে যার ফলে এরা উৎপন্ন ইলেকট্রনগুলিকে কেন্দ্রীভূত ক'রে পরবর্ত্তী প্লেটের উপর

চিত্র 8·5

চমক গণনকারের সাধারণ আয়োজন। প্রথমে থাকে পাতলা এ্যালুমিনিয়ামের আবরণ মোড়া একটি NaI স্ফটিক, তারপরে একটি ইলেকট্রন উৎপাদক অর্থাৎ যার ভিতর NaI স্ফটিক থেকে উদ্ভূত কণাগুলি ইলেকট্রন উৎপন্ন করে এবং পরিশেষে ইলেকট্রনবর্দ্ধক নলের আয়োজন। ফোটোক্যাথোডগুলির মধ্যে যেকোন একটির তুলনায় পরবর্ত্তীটি অধিকতর বিভবে থাকে যা চিত্রের আয়োজনে দেখান হয়নি।

এনে ফেলতে পারে। সর্ব্বশেষ প্লেটটি বিভববিভ্যয় নির্দ্দেশক যন্ত্রের সঙ্গে যুক্ত থাকে। ত্বরিত ইলেকট্রনগুলি ধাতুর পাতের ভিতর আয়নীকরণ প্রক্রিয়ার দ্বারা ইলেকট্রন উৎপন্ন করে এবং একটি শক্তিশালী ইলেকট্রন বহুসংখ্যক নূতন ইলেকট্রন উৎপন্ন করতে সক্ষম। ধরা যাক, প্রতিটি ইলেকট্রন পাঁচটি

নূতন ইলেকট্রন উৎপন্ন করে, তবে যে টিউবের ভিতর 12টি চক্রে ইলেকট্রন উৎপাদন ঘটে সেটির ভিতর যে বর্ধিতকরণ সৃষ্টি হবে তা হ'ল

$$5^{12} = 2 \cdot 4 \times 10^{8}$$

ইলেকট্রনবর্ধক নলের ব্যবহার প্রচলিত হবার ফলেই বর্তমানে চমক গণনকারের এতদূর উন্নতিসাধন সম্ভব হয়েছে যে এখন এটি একটি অন্যতম শ্রেষ্ঠ তেজস্ক্রিয় বিকিরণ নির্দেশক যন্ত্রে পরিণত হয়েছে।

চমক সৃষ্টিকারী পদার্থের পছন্দ নির্ভর করে—কি বিশেষ ধরনের বিকিরণ পর্যবেক্ষণ করা হবে তার উপর। আলফাকণার জন্য সাধারণতঃ জিঙ্ক সালফাইড স্ফটিক ব্যবহার করা হয় এবং বিটাকণার জন্য এ্যানথ্রাসিনের ব্যবহার প্রচলিত। সোডিয়াম আওডাইড সামান্য থ্যালিয়াম মিশ্রিত অবস্থায় গামারশ্মি পর্যবেক্ষণের পক্ষে বিশেষ উপযোগী। কোন কোন পরীক্ষায় অতি-বৃহৎ আয়তনের চমক সৃষ্টিকারী তরল পদার্থ ব্যবহৃত হয়েছে। চমক গণনকারের পরীক্ষার আয়োজন গাইগার মূলার গণনকারের তুলনায় অনেক বেশী জটিল, তার কারণ এক্ষেত্রে বর্ধিতকরণ ও স্থিতাবস্থার প্রয়োজন অনেক বেশী। কিন্তু চমক গণনকারের বিশ্লিষ্টকরণ ক্ষমতা গাইগার মূলার গণনকারের তুলনায় বহুগুণ বেশী এবং যেহেতু পর্যবেক্ষণের জন্য এক্ষেত্রে আপতিত বিকিরণ কঠিন পদার্থের ভিতর শোষিত হয় এজন্য চমক গণনকারের গামারশ্মি নির্দেশনের ক্ষমতা অন্যান্য গণনকারের তুলনায় বেশী। নানাধরণের চমক সৃষ্টিকারী পদার্থের ব্যবহারের দ্বারা আজকাল 10^{-9} সেকেণ্ড বিশ্লিষ্টকরণ সময় সৃষ্টি করা সম্ভব হয়েছে।

চমক সৃষ্টিকারী স্ফটিকের ভিতর উৎপন্ন আলোকশক্তির পরিমাণ আপতিত বিকিরণের শক্তির সমানুপাতী এবং এজন্য এইসব স্ফটিক আপতিত বিকিরণের শক্তি নিরূপণের জন্য ব্যবহৃত হতে পারে। বিশেষ ইলেকট্রনিক বর্তনীর সাহায্যে এমন আয়োজন সৃষ্টি করা যায় যাতে যেসব বিভবব্যত্যয়ের আকার $V + \Delta V$ এবং $V - \Delta V$-এর মধ্যে অবস্থান করে সেইগুলিই একমাত্র গণ্য হয় (ΔV-এর পরিমাণ স্বল্প), এভাবে অতি সহজেই আপতিত বিকিরণের ভিতর শক্তির বিতরণ পর্যবেক্ষণ করা যেতে পারে।

ফোটোগ্রাফীয় অবদ্রব পদ্ধতি (Photographic Emulsion Technique)

তেজস্ক্রিয় বিকিরণ ফোটোগ্রাফীয় প্লেটকে কালো ক'রে ফেলতে পারে, বাস্তবিকপক্ষে তেজস্ক্রিয়তা সর্বপ্রথম আবিষ্কৃত হয় ফোটোগ্রাফীয় প্লেটের

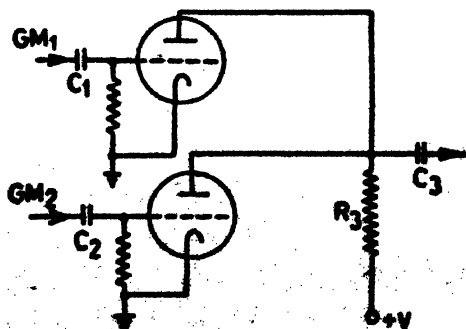
তিনি তেজস্ক্রিয় বিকিরণের ক্রিয়া লক্ষ্য ক'রে। বর্ত্তমানেও ফোটোগ্রাফীর অবদ্রব তেজস্ক্রিয় বিকিরণের পর্য্যবেক্ষণের জন্য ব্যবহৃত হয়। এই পদ্ধতিতে তেজস্ক্রিয় বিকিরণজাত কণাগুলিকে কোন উপায়ে ফোটোগ্রাফীর অবদ্রবের ভিতর দিয়ে চালিত ক'রে দেওয়া হয়, পরে ফোটোগ্রাফীর প্লেটটি রাসায়নিক উপায়ে প্রতিভাত (develop) করলে এর ভিতর কণাটির সমগ্র গতিপথের ছবি ফুটে ওঠে। ফোটোগ্রাফীর অবদ্রবের উপর সাধারণ আলো এবং কেন্দ্রীন-জাত বিকিরণের ক্রিয়ার পদ্ধতি অভিন্ন। অবদ্রবের ভিতর সিলভার ব্রোমাইডের ক্ষুদ্র ক্ষুদ্র দানা মেশান থাকে, যখন আয়নীকরণক্ষম কণা অবদ্রবের ভিতর এই দানাগুলির মধ্য দিয়ে চলে যায় তখন ঐগুলি এর প্রভাবে একটি বিশেষ স্পর্শকাতর নূতন দশা প্রাপ্ত হয়, যার ফলে প্রতিভাত করার সময় এই দানাগুলির ভিতর থেকে রূপা অনেক বেশী দ্রুত বিজারিত হয়। এই বিজারিত কালো রূপার দানাগুলি সমগ্র গতিপথ বরাবর জমে ওঠে এবং গতিপথটিকে দৃষ্টিগোচর করায়। ফোটোগ্রাফীর প্লেটের অন্যান্য অঞ্চল যেখানে বিজারণ ঘটে না, সেগুলি সাদা থাকে। অনেক সময় বিশেষভাবে প্রস্তুত ফোটোগ্রাফীর অবদ্রবের ভিতর খুব সামান্য পরিমাণে তেজস্ক্রিয় পদার্থ মিশিয়ে দেওয়া হয়, তেজস্ক্রিয় বিকিরণজাত কণাগুলি অবদ্রবের ভিতর ছড়িয়ে পড়ে এবং এদের গতিপথের দাগ রেখে যায়, প্লেটগুলি প্রতিভাত করলে ঐগুলি দৃষ্টিগোচর হয়। অবশ্য এইসব ছবিগুলি খালি চোখে দেখা যায় না, শক্তিশালী অণুবীক্ষণের দ্বারাই একমাত্র এদের দেখা সম্ভব। ফোটোগ্রাফীর অবদ্রব পদ্ধতির দ্বারা সমস্তরকমের আহিত কণা পরীক্ষা করা সম্ভব, যে কণার আয়নীভবন খুব বেশী তার গতিপথটি হয় একটি স্থূল ছোট রেখা। গতিপথের উপর দানার ঘনত্ব লক্ষ্য ক'রে কণাগুলির আধান নির্ণয় করা যায়, এই ঘনত্ব কণাটির দ্বারা আয়নীভবনের ঘনত্বের সমানুপাতী হয়।

ফোটোগ্রাফীর অবদ্রব মহাজাগতিক রশ্মির গবেষণায় বহুল পরিমাণে ব্যবহৃত হয়েছে। ব্যবহারের পদ্ধতি খুব সরল, অবদ্রব মাখান কতগুলি প্লেট একত্রে জড়ো ক'রে কোন পাহাড়ের উপর বা কোন উঁচু বাড়ীর ছাদে বেশ কিছুদিন যাবৎ রাখা হয়। ঐ সময়ের মধ্যে মহাজাগতিক রশ্মির কণাগুলি ঐ অবদ্রবের ভিতর প্রবেশ ক'রে তাদের গতিপথের ছাপ রেখে যায় যেগুলি প্রতিভাত করার পর দৃষ্টিগোচর হয়। ফোটোগ্রাফীর অবদ্রব পদ্ধতি ব্যবহার ক'রে মহাজাগতিক রশ্মির গবেষণায় এবং উচ্চ শক্তির কেন্দ্রীন ঘটিত বিক্রিয়ায় কয়েকটি নূতন কণা আবিষ্কৃত হয়েছে। মেঘকক্ষ বা বুদ্বুদকক্ষের সক্রিয়কাল অতি সামান্য, কিন্তু অবদ্রব বহুদিন পর্য্যন্ত সমানে সক্রিয় থাকতে পারে। এসব কারণের জন্য

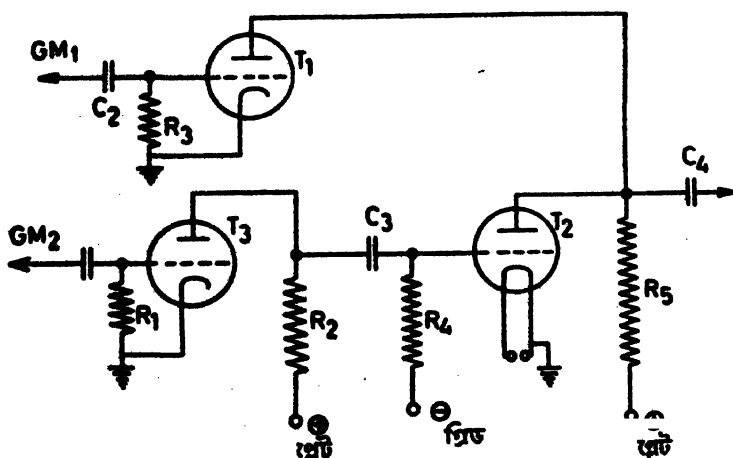
বিভিন্ন পরীক্ষায় এদের ব্যবহার করার সুবিধা অনেক। কিন্তু অবস্রব পদ্ধতির প্রধান দুর্বলতা হ'ল যে অবস্রবের ক্রিয়াশীল পুরুত্বের পরিমাণ অতি সামান্য এবং কণাগুলি ফোটোগ্রাফীর প্লেটের সমতলের সঙ্গে সমান্তরালভাবে অগ্রসর না হলে আর গতিপথটি দেখতে পাওয়া সম্ভব হয় না।

তাৎক্ষণিকতা এবং প্রতীপ তাৎক্ষণিকতা আয়োজন (Coincidence & anti-coincidence arrangements)

অনেক সময়, যখন দুই বা ততোধিক গণনকারের ভিতর ঠিক একই সময়ে বিভবব্যত্যয় উৎপন্ন হয়, সেইরকম ঘটনাগুলি গণ্য করা প্রয়োজন হয়। আবার কখন কখন যখন একটি ভিন্ন অপর সমস্ত গণনকারগুলিতে একই সঙ্গে ব্যত্যয় সৃষ্টি হয় ঠিক সেই বিশেষ ঘটনাটি গণ্য করা প্রয়োজন হয়ে পড়ে। বিশেষ ক'রে কেন্দ্রীন এবং মহাজাগতিক রশ্মির গবেষণায় এই ধরণের বর্তনী খুবই ব্যবহৃত হয় এবং দ্বাদশ অধ্যায়ে এদের প্রয়োগের কয়েকটি দৃষ্টান্ত দেওয়া হবে। বহুসংখ্যক ঘটনার ভিতর থেকে একটি বিশেষ ধরণের ঘটনাকে বেছে নেবার জন্য এই ধরণের বর্তনীর ব্যবহার হয়ে থাকে এবং অনেকক্ষেত্রেই এদের সঙ্গে সময়বিরতি সৃষ্টিকারী অপর বর্তনী যোগ ক'রে বিভিন্ন সময়ে উৎপন্ন বিভবব্যত্যয়গুলি তুলনা করার ব্যবস্থা করা সম্ভব। এই ধরণের বিভিন্ন প্রকারের বর্তনী ব্যবহৃত হয়েছে, আমরা বর্তমানে বিজ্ঞানী রোসি প্রবর্তিত বর্তনীটির বর্ণনা দেব।

8·6 চিত্রে রোসি তাৎক্ষণিকতা বর্তনীর আয়োজন দেখান হয়েছে, এক্ষেত্রে দুটি বিভিন্ন গাইগার মুলার (GM) গণনকারের দ্বারা উৎপন্ন ব্যত্যয়ের ক্ষেত্রে বর্তনীটির প্রয়োগ বর্ণনা করা হয়েছে। যে দুটি ট্রায়োড ভাল্ভ দেখান হয়েছে

চিত্র 8·6
দুই গণনকারের তাৎক্ষণিকতা আয়োজন।

এদের উভয়ের ক্ষেত্রেই স্বাভাবিক অবস্থায় গ্রিডে (grid) কোন ঋণ বিভব থাকে না, এজন্য এরা উভয়েই যথেষ্ট পরিমাণে প্লেটপ্রবাহ (plate current) উৎপন্ন করে। সবগুলি টিউবের মোট প্লেটপ্রবাহ R_s রোধের মধ্য দিয়ে প্রবাহিত হয় এবং এজন্য এই রোধের উভয় প্রান্তের বিভব-ব্যবধানের পরিমাণ যথেষ্ট অধিক থাকে। একটি GM টিউবের ভিতর থেকে একটি ঋণ বিভবব্যত্যয় উৎপন্ন হলে তা গ্রিডের উপর প্রযুক্ত হয়ে ঐ ট্রায়োডের প্লেটপ্রবাহ বন্ধ ক'রে দেয় কিন্তু অপরটির প্লেটপ্রবাহ সমানভাবেই চলতে থাকে, এজন্য R_s-এর ভিতর দিয়ে বিদ্যুৎপ্রবাহ সামান্যই হ্রাস পায়। এর ফলে সঞ্চারক C_s-এর ভিতর দিয়ে বিভবের পরিবর্তন বিশেষ লক্ষিত হয় না। কিন্তু যদি উভয় GM টিউব থেকে একই সঙ্গে ঋণ বিভবব্যত্যয় উৎপন্ন হয় তাহলে তখন তাৎক্ষণিকতা আয়োজনে বদ্ধ দুটো টিউবের ভিতর দিয়েই বিদ্যুৎপ্রবাহ সম্পূর্ণ বন্ধ হয়ে যাবে এবং তখন R_s-এর ভিতর দিয়ে প্রবাহ হবে নেহাৎই নগণ্য। এর ফলে C_s-এর ভিতর দিয়ে একটি বৃহৎ ধন বিভবব্যত্যয় সৃষ্টি হয়ে আসবে।

প্রতীপ তাৎক্ষণিকতা আয়োজন সৃষ্টি করা সম্ভব হয় যদি এদের মধ্যে একটি গণনকার থেকে উৎপন্ন বিভবব্যত্যয়ের দশা সম্পূর্ণ বিপরীত ক'রে

চিত্র 8·7
দুই গণনকারের প্রতীপ তাৎক্ষণিকতা আয়োজন।

দেওয়া যায়। এটা করা সম্ভব অপর একটি ভ্যাকুয়াম টিউব ব্যবহার ক'রে যেমন 8·7 চিত্রে দেখান হয়েছে। T_1 টিউবটির কোন গ্রিড বায়াস বিভব নেই সুতরাং এটি পুরো প্লেটপ্রবাহ সৃষ্টি করে, কিন্তু T_2 টিউবের মধ্যে ঋণ

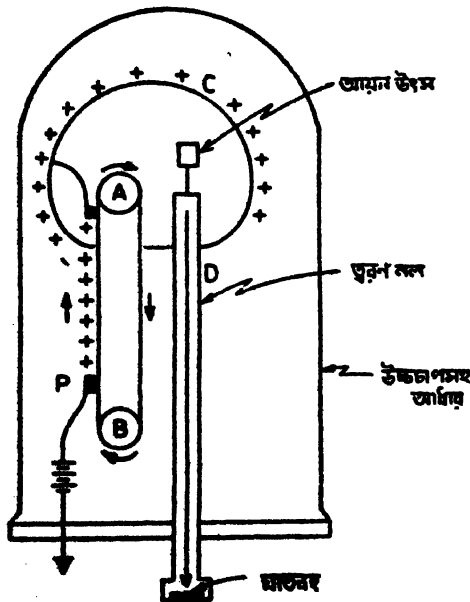
গ্রিড বায়াস প্রয়োগ ক'রে এটিকে সম্পূর্ণ বন্ধ ক'রে দেওয়া হয়েছে। যখন GM_1 গণনকার থেকে একটি ঋণ বিভবব্যত্যয় বেরিয়ে আসে তখন আংকাণিকতা আয়োজনের মধ্যে T_1 টিউবটি সম্পূর্ণ বন্ধ হয়ে যাবে। যদি একই সঙ্গে GM_2 গণনকারটি থেকেও একটি বিভবব্যত্যয় উৎপন্ন হয়ে আসে তবে T_2 বন্ধ হয়ে যাবে। T_2-এর গ্রিডে সংযোগকারী সঞ্চয়ক C_3-এর মাধ্যমে একটি ধনবিভব আরোপিত হবে এবং তার ফলে T_3-এর ভিতর পুরো প্লেটপ্রবাহ শুরু হয়ে যাবে। অর্থাৎ T_1 এবং T_2 গণনকারদ্বয় পরস্পরের ভূমিকা বিনিময় করছে, এর ফলে R_3-এর ভিতর দিয়ে বিদ্যুৎপ্রবাহের কোন পরিবর্তন হবে না এবং C_4-এর মধ্য দিয়ে কোন বিভবব্যত্যয় উৎপন্ন হয়ে আসবে না। সুতরাং যদি শুধু GM_1-এর মধ্য থেকে একটি ব্যত্যয় উৎপন্ন হয় এবং GM_2 থেকে তাৎক্ষণিক কোন ব্যত্যয় উৎপন্ন না হয়, তবেই শুধু C_4-এর ভিতর দিয়ে একটি ব্যত্যয় উৎপন্ন হয়ে আসতে পারে, কারণ সে-অবস্থায় R_3-এর ভিতর দিয়ে বিদ্যুৎপ্রবাহের সবিশেষ পরিবর্তন ঘটবে।

ত্বরণ প্রক্রিয়া

তেজস্ক্রিয় বিকিরণ থেকে যেসব আলফাকণা বা ইলেকট্রন পাওয়া যায় তাদের শক্তি সাধারণতঃ হয় বেশীর পক্ষে মাত্র কয়েক এমইভি, কিন্তু বর্তমানে কেন্দ্রীন ও মৌলিক কণা সংক্রান্ত গবেষণায় অনেক বেশী শক্তিশালী কণার প্রয়োজন হয়। যথোপযুক্ত শক্তিশালী কণার আঘাতে কেন্দ্রীনের বহুরকম বিক্রিয়া ঘটতে পারে, এইভাবে আঘাত ক'রে একটি কেন্দ্রীনকে কৃত্রিমভাবে অপর একটি কেন্দ্রীনে রূপান্তরিত করা যায়। শক্তিশালী আলফাকণা, প্রোটন, কার্বন আয়ন ইত্যাদির আঘাতে এইসব বিক্রিয়া ঘটতে পারে। তেজস্ক্রিয় বিকিরণজাত আলফাকণার শক্তিতে খুব কমসংখ্যক বিক্রিয়াই ঘটতে পারে, অধিকাংশ বিক্রিয়ার জন্যই প্রয়োজন হয় অধিকতর শক্তিশালী আঘাতকারী কণা যেগুলি সাধারণতঃ শুধু কৃত্রিম উপায়ে ত্বরিত ক'রেই যথেষ্ট পরিমাণে উৎপন্ন করা সম্ভব। বর্তমানে কেন্দ্রীনের বলগুলির প্রকৃতি সম্বন্ধে জানবার অন্যতম উপায় হ'ল খুব শক্তিশালী কণার দ্বারা বিচ্ছুরণ অথবা বিক্রিয়া ঘটিয়ে সেই বিচ্ছুরণের ফলাফল বিশ্লেষণ করা, এই ধরণের গবেষণার অতিশয় শক্তিশালী ইলেকট্রন বা প্রোটনের প্রয়োজন হয় এবং বর্তমানে বহুসংখ্যক ত্বরণযন্ত্র নির্মিত হয়েছে যাদের সাহায্যে এইসব অতীব শক্তিশালী কণা পরীক্ষাগারে যথেষ্ট সংখ্যায় উৎপন্ন করা সম্ভব। কৃত্রিম উপায়ে ত্বরিত কণাগুলির শক্তি তেজস্ক্রিয় বিকিরণ থেকে প্রাপ্ত সর্বাধিক শক্তিবিশিষ্ট কণার

শক্তির তুলনায় বহুগুণ বেশী হতে পারে। তেজস্ক্রিয় ক্ষরণে যে বিটাকণা উৎপন্ন হয় তাদের শক্তি কোনক্ষেত্রেই দশ এমইভি-এর অধিক হতে দেখা যায় না, কিন্তু ত্বরণযন্ত্রের দ্বারা বর্তমানে ইলেকট্রনকে 40 বিইভি শক্তিতে ত্বরিত করা সম্ভব হয়েছে। তেজস্ক্রিয় ক্ষরণ সম্ভূত কোন আলফাকণার শক্তি সাধারণতঃ আট-নয় এমইভির বেশী হয় না, কিন্তু ত্বরণযন্ত্রে প্রোটনকে 100 বিইভি শক্তিতে ত্বরিত করা যায়। বলাই বাহুল্য এইসব অস্বাভাবিক শক্তিসম্পন্ন কণার দ্বারা আঘাত ঘটিয়ে কেন্দ্রীন ও কণাজগতে বহু নূতন নূতন প্রক্রিয়া আবিষ্কৃত হয়েছে। বর্তমানে আমরা কয়েকটি সুপরিচিত ত্বরণযন্ত্রের কিছু সংক্ষিপ্ত বিবরণ দেব।

ভ্যান ডি গ্রাফ স্থিরবিদ্যুৎ উৎপাদক (Van De Graaf Electrostatic Generator)

বৈদ্যুতিক ক্ষেত্রের ভিতর একটি আহিত কণা রাখলে বৈদ্যুতিক বল কণাটির উপর ক্রিয়া ক'রে এটিকে ত্বরিত করে; যেসমস্ত ত্বরণযন্ত্র এপর্যন্ত নির্মিত

চিত্র 8·8
ভ্যান ডি গ্রাফ স্থিরবিদ্যুৎ উৎপাদক।

হয়েছে তাদের সবগুলিতেই কোন না কোন উপায়ে উপরোক্ত প্রক্রিয়ার আশ্রয় নিয়ে আহিত কণাগুলিকে ত্বরিত করা হয়। সবচেয়ে পুরনো ত্বরণযন্ত্রের

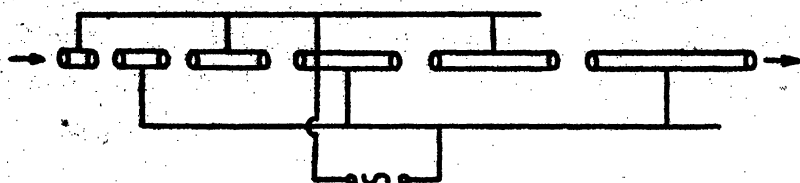
মধ্যে ভ্যান ডি গ্রাফ স্থিরবিদ্যুৎ উৎপাদকের নাম উল্লেখযোগ্য ; এই যন্ত্রটির ক্রিয়াপদ্ধতি 4·4 চিত্রে বিশ্লেষণ করা হয়েছে। A ও B দুইটি চাকা, C একটি ফাঁপা ধাতুর গোলক, A এবং B-এর সঙ্গে একটি অপরিবাহী পদার্থে নির্মিত বেল্ট লাগান আছে যা উভয়কে বেষ্টন ক'রে ক্রমাগত আবর্তিত হয়ে চলেছে। B-এর সামনে P তীক্ষ্ণ ধাতুর শলাকা দ্বারা তৈরী একটি ব্রাশ যা বেল্টটিকে প্রায় ছুঁয়ে রয়েছে, এটি 5 ~ 20 কিলোভোল্ট বিভবে থাকে এবং এর কাজ হ'ল বেল্টটির গায়ে আধান ছিটিয়ে দেওয়া। P-এর মধ্য দিয়ে ধন বৈদ্যুতিক আধান এসে বেল্টটির গায়ে জড়ো হয় এবং এটি নিজস্ব গতির প্রভাবে ঐ আধান বহন ক'রে A-এর দিকে নিয়ে যায়। A-এর সামনে অপর একটি একই প্রকারের ব্রাশ রয়েছে যা বেল্টের গা থেকে সমস্ত আধান সংগ্রহ ক'রে C ধাতুগোলকটির মধ্যে সঞ্চারিত করে। এইভাবে প্রত্যেকবার ঘুরবার সময় বেল্ট P থেকে কিছু আধান সংগ্রহ ক'রে C-এর ভিতর তা সঞ্চিত করে। এইভাবে ক্রমশঃ ধাতুগোলকটির ভিতর আধানের পরিমাণ বৃদ্ধি পেতে থাকে এবং এটি উচ্চতর বিভব অর্জ্জন করতে থাকে। গোলকাকৃতি ধাতুপাত্র C-এর অভ্যন্তর শূন্য, এর ভিতরের তলে কোন আধান থাকতে পারে না এবং অভ্যন্তরস্থ বৈদ্যুতিক ক্ষেত্রের তীব্রতাও শূন্য, এই কারণে ধাতুগোলক যতই উচ্চবিভব অর্জ্জন করুক না কেন, প্রতিবারই আবর্ত্তনের ফলে বেল্টের গা থেকে কিছু আধান এর গায়ে এসে জড়ো হবে। গোলকটির আধান ক্রমশঃ বৃদ্ধি পেতে থাকে যতক্ষণ পর্য্যন্ত না এটি থেকে মাটিতে বা অন্যত্র সরাসরি বিদ্যুৎমোক্ষণ আরম্ভ হয়। অধিকাংশ ক্ষেত্রেই সমগ্র আয়োজনটিকে একটি উচ্চচাপের আবরণের ভিতর রেখে দেওয়া হয় যার ফলে বিদ্যুৎমোক্ষণের পরিমাণ অনেক হ্রাস পায় এবং আরও উচ্চতর বিভব অর্জ্জন করা সম্ভব হয়। পাত্রটির গোলাকার আকৃতিও তড়িৎমোক্ষণের সম্ভাবনা হ্রাস করতে সাহায্য করে। D একটি বায়ুশূন্য নল, এটি অপরিবাহী পদার্থে গঠিত। যেসব আয়ন বা ইলেকট্রনগুলিকে ত্বরিত করা হবে, গোলকের ভিতর D নলের একটি প্রান্তে সেগুলি প্রবেশ করিয়ে দেওয়া হয় এবং গোলকের বাইরে নলের অপর প্রান্তটি শূন্যবিভবে রাখা হয়। এই বিভব-ব্যবধানের দ্বারা ত্বরিত হবার পর আয়নগুলি পরীক্ষাধীন ঘাতবহকে আঘাত করে। ভ্যান ডি গ্রাফ যন্ত্রে ইলেকট্রন প্রোটন, ডয়টেরন, আলফাকণা কিংবা অন্যান্য ভারী মৌলের আয়ন, সব কিছুই ত্বরিত করা যায়। এ যন্ত্রে এপর্য্যন্ত সর্ব্বাধিক যে বিভব-ব্যবধান সৃষ্টি করা সম্ভব হয়েছে তা প্রায় 10^7 ভোল্ট, অর্থাৎ একটি প্রোটনকে তাতে 10 এমইভি শক্তিতে ত্বরিত করা যায়। ভ্যান ডি গ্রাফ যন্ত্রে একবারই মাত্র ত্বরণ ঘটে এবং এজন্য কণাগুলির প্রান্তিক শক্তি নির্ভর করে শুধু অর্জিত চরম

বিভব-ব্যবধানের উপর। বর্তমানে মুখ্যতঃ ভারী কেন্দ্রীনের ত্বরণ এবং অত্যন্ত শক্তিশালী রঞ্জনরশ্মি উৎপাদনের জন্যই ভ্যান ডি গ্রাফ যন্ত্রের ব্যবহার হয়ে থাকে। ভ্যান ডি গ্রাফ যন্ত্রের একটি বিশেষ সুবিধা হচ্ছে এই যে, যেসব ত্বরিত কণাগুলি ধাতবহের উপর গিয়ে পৌঁছায় তাদের মধ্যে শক্তির তারতম্য হয় খুব কম, শক্তিভেদের পরিমাণ 10^4 ভাগের মধ্যে এক ভাগ পর্য্যন্ত করা সম্ভব।

সরলরৈখিক ত্বরণ

অপর এক ধরণের সরলরৈখিক ত্বরণের বহুল প্রচলন আছে যেখানে আহিত কণাগুলিকে বারবার একটি নির্দ্দিষ্ট বিভব-ব্যবধানের মধ্য দিয়ে নিয়ে যাওয়া হয় এবং এইভাবে অনেকবার ত্বরণ ঘটার ফলে ক্রমশঃ এদের শক্তি বৃদ্ধিপ্রাপ্ত হয়। 8.9 চিত্রে একটি সরলরৈখিক ত্বরকের আয়োজন দেখা যাচ্ছে। ক্রমবর্দ্ধিত দৈর্ঘ্য সমন্বিত কতগুলি নল পাশাপাশি রাখা হয়েছে এবং যেকোন দুটি পাশাপাশি নলের ভিতর সমান দৈর্ঘ্যের অল্প একটু ফাঁক রাখা হয়েছে। প্রথম, তৃতীয়, পঞ্চম ইত্যাদি নলগুলির মধ্যে সরাসরি বৈদ্যুতিক সংযোগ রয়েছে; তেমনি আবার দ্বিতীয়, চতুর্থ ইত্যাদি নলগুলিও পরস্পরের সঙ্গে বৈদ্যুতিক সংযোগে যুক্ত, অর্থাৎ নলগুলিতে এমনভাবে বৈদ্যুতিক সংযোগসাধন করা হয়েছে যে প্রতিটি নল একটি বাদ দিয়ে পরবর্ত্তীটির সঙ্গে যুক্ত। এই দুই শ্রেণীর নলগুলি আবার একটি বিপরীতায়নশীল বিভব উৎসের সঙ্গে যুক্ত, যেমন চিত্রে দেখা যাচ্ছে। ফলে, যে মুহূর্ত্তে প্রথম শ্রেণীর নলগুলি ধনবিভবে থাকে সেই মুহূর্ত্তে দ্বিতীয় শ্রেণীর নলগুলি থাকে ঋণ-বিভবে। কিছুক্ষণ পর আবার ঠিক বিপরীত অবস্থার উদ্ভব হয় অর্থাৎ বিভবের অর্দ্ধস্পন্দনের পর প্রথম শ্রেণীর নলগুলি ঋণবিভবে চলে যায় এবং দ্বিতীয় শ্রেণী ধনবিভব অর্জ্জন করে। ঠিক নির্দ্দিষ্ট সময় অন্তর পর পর বিভবের এই বিপরীতায়ন ঘটতে থাকে। ধরা যাক, কতগুলি ধন আধান-বিশিষ্ট আয়নকে ত্বরিত করা হবে, এগুলি প্রথম ও দ্বিতীয় নলের মাঝখানের ফাঁকটিতে প্রবেশ করে যখন দ্বিতীয় নলটি ঋণবিভবে থাকে, এজন্য এই ফাঁকের ভিতর আয়নগুলি কিয়ৎপরিমাণে ত্বরিত হয়। দ্বিতীয় নলটির দৈর্ঘ্য ঠিক এমন নির্দ্দিষ্ট থাকে যাতে আয়নগুলি যতক্ষণে ঐ দৈর্ঘ্য অতিক্রম করবে ঠিক ততক্ষণের মধ্যে পরবর্ত্তী নলটির বিভব উল্টে গিয়ে ঋণবিভবে পরিণত হয়েছে। সুতরাং আয়নগুলি যখন দ্বিতীয় ফাঁকটির ভিতর উপস্থিত হয় তখন আবার তৃতীয় নলের ঋণবিভবের সম্মুখীন হয় এবং পুনরায় ত্বরিত হয়। চতুর্থ, পঞ্চম ইত্যাদি পর পর নলগুলির দৈর্ঘ্যও এমন নির্দ্দিষ্ট থাকে

যাতে প্রতিবারই কণাগুলি যখন পরবর্তী নলে প্রবেশ করতে যায় তখনই কণাবিভবের সম্মুখীন হয় এবং ত্বরিত হয়।

চিত্র ৪·৭ : সরলরৈখিক ত্বরকের আয়োজন।

যেহেতু বিভব বিপরীতায়নের সময় নির্দিষ্ট ধ্রুব, সুতরাং প্রতিবারই আয়নগুলিকে ঠিক ঐ নির্দিষ্ট সময় পরই পরবর্তী নলের সম্মুখীন হতে হবে। প্রত্যেকবার ত্বরণের ফলে আয়নগুলির গতিবেগ বৃদ্ধি পায় এজন্য পরবর্তী নলটি আরেকটু লম্বা করা হয় যাতে কণাগুলি এর ভিতর ঠিক অর্দ্ধস্পন্দনকাল যাপন করতে পারে এবং এর পরবর্তী নলের মুখে ত্বরণের দশায় এসে উপস্থিত হতে পারে। এইভাবে বহুসংখ্যক নল পাশাপাশি সাজিয়ে আয়নগুলিকে যেকোন শক্তিতে ত্বরিত করা যেতে পারে। এই পদ্ধতিতে ইলেকট্রনের ত্বরণের ক্ষেত্রে একটু প্রভেদ আছে। যদি ~2 এমইভি শক্তির ইলেকট্রন নিয়ে শুরু করা যায় তবে সেক্ষেত্রে প্রতিটি নলের দৈর্ঘ্যই সমান রাখতে হবে কারণ ঐ শক্তিতে ইলেকট্রনের গতিবেগ প্রায় আলোর গতিবেগের সমান এবং ত্বরণের ফলে গতিবেগের বিশেষ কোন বৃদ্ধি ঘটে না। আমেরিকার স্টানফোর্ডে ইলেকট্রনের জন্য একটি সরলরৈখিক ত্বরণযন্ত্র নির্মিত হয়েছে যাতে ইলেকট্রনকে 40 বিইভি শক্তিতে ত্বরিত করা সম্ভব।

চক্রত্বরণ

ত্বরণ যন্ত্রের মধ্যে যেগুলি সর্বাধিক প্রসিদ্ধ সেগুলির ভিতর কণাগুলি চক্রাকারে পরিভ্রমণ ক'রে ত্বরিত হয়। এইসব যন্ত্রে আহিত কণাগুলিকে বারবার একটা চক্রাকার পথে ঘোরান হয়, প্রতিবার ঘূর্ণনের সময় কণাগুলি এক বা একাধিক বিভব-ব্যবধানের ভিতর দিয়ে চালিত হয় এবং এইভাবে এরা ক্রমশঃ শক্তি সঞ্চয় করে। এই ধরনের চক্রত্বরণ-যন্ত্র প্রথম নির্মাণ করেন মার্কিণ বিজ্ঞানী ই. ও. লরেন্স, এঁর নির্মিত যন্ত্রটির নাম সাইক্লোট্রন (Cyclotron) বা চক্রত্বরক।

৪·10 চিত্রে সাইক্লোট্রন যন্ত্রের আয়োজন দেখান হয়েছে। A এবং B দুটি অর্দ্ধচন্দ্রাকৃতি চ্যাপ্টা ফাঁপা পাত্র, এদের একটি বায়ুশূন্য আধারের ভিতর মুখোমুখি

রাখা হয় এবং এদের উপর লম্বভাবে একটি সমমাত্র চৌম্বকক্ষেত্র বিদ্যমান থাকে (8·10 চিত্রে চৌম্বকক্ষেত্রটি কাগজের সমতলের সঙ্গে লম্বভাবে আছে)। পাত্রদ্বয়ের মাঝে অল্প একটু ফাঁক আছে এবং মাঝখানে C চিহ্নিত স্থানে আয়নের উৎস রাখা হয়। এই উৎসের ভিতর থেকে নির্গত হয়ে আয়নগুলি পাত্রদ্বয়ের অভ্যন্তরে চৌম্বকক্ষেত্রের সঙ্গে সমকোণে অবস্থিত এক সমতলে ঘুরতে থাকে, তীর চিহ্নিত স্পাইর‍্যাল রেখার দ্বারা আয়নগুলির গতিপথ দেখান হয়েছে। A ও B ফাঁপা পাত্র দুটি একটি ধ্রুব স্পন্দনাঙ্কে বিপরীতায়নশীল বিভব উৎসের সঙ্গে যুক্ত থাকে। মনে করা যাক ধন আহিত কোন কণাকে ত্বরিত করা হচ্ছে, কণাটি প্রথমে চৌম্বকক্ষেত্রের প্রভাবে A পাত্রটির ভিতর একটি অর্দ্ধবৃত্তাকৃতি পথ অতিক্রম করার পর যখন B পাত্রে প্রবেশ করে তখন পাত্রদ্বয়ের মধ্যে স্থাপিত বৈদ্যুতিকক্ষেত্রের দ্বারা ত্বরিত হয়। ঠিক ঐ মুহূর্ত্তে B পাত্রটি ঋণ এবং A পাত্রটি ধনবিভবে আবিষ্ট থাকে। যে সময়ের মধ্যে কণাটি B পাত্রের ভিতর আবার একটি অর্দ্ধবৃত্তাকার পথ অতিক্রম করার পর পুনরায় A পাত্রের দিকে অগ্রসর হয় সে সময়ের ব্যবধানে পাত্র দুটির বিভবের প্রকৃতি বিপরীত হয়ে গিয়েছে, অর্থাৎ A ঋণ ও B ধন বিভবে আবিষ্ট হয়েছে। সুতরাং কণাটি যখন B থেকে Aতে প্রবেশ করতে যায় তখন পুনরায় ত্বরিত হয়। এইভাবে পাত্রদ্বয়ের বিভবের প্রকৃতি এমন নির্দ্দিষ্ট স্পন্দনাঙ্কে বদলাতে থাকে যে, যখনই কণাটি একটি পাত্র থেকে অপর পাত্রে প্রবেশ করে তখনই এটি ত্বরিত হয়। কিন্তু প্রত্যেকবার ত্বরণের পর কণাটির শক্তি বৃদ্ধি পায় এবং এজন্য পরবর্ত্তী গতিপথের ব্যাসার্দ্ধও বর্দ্ধিত হয়, যখন এভাবে ব্যাসার্দ্ধের পরিমাণ বৃদ্ধি পেয়ে পাত্রদ্বয়ের ব্যাসার্দ্ধের সমান হয়ে পড়ে তখনই কণাটি সর্ব্বোচ্চ শক্তি অর্জ্জন করে। এই সময় সাধারণতঃ অপর একটি বিক্ষেপণকারী স্থির বৈদ্যুতিক ক্ষেত্রের (D) সাহায্যে শক্তিপ্রাপ্ত কণাটিকে যন্ত্রের বাইরে নিয়ে আসা হয়।

মনে করা যাক অর্দ্ধবৃত্তাকৃতি পাত্রদ্বয়ের উপর লম্ব চৌম্বকক্ষেত্রের তীব্রতা B এবং ত্বরণশীল কণাটির আধান Ze, যদি ক্ষেত্রের প্রভাবে কণাটি একটি বৃত্তাকার পথে ঘুরতে থাকে তবে আমরা লিখতে পারি

$$\frac{ZeBv}{c}=\frac{mv^2}{r}$$

এখানে r কণাটির গতিপথের বক্রতার ব্যাসার্দ্ধ, অর্থাৎ

$$r=\frac{mvc}{BZe} \qquad \ldots \qquad 8·2$$

v গতিতে কণাটি একটি অর্দ্ধবৃত্তাকার পথে ঘোরে যার ব্যাসার্দ্ধ r। সুতরাং এই অর্দ্ধবৃত্ত অতিক্রম করতে এর মোট সময় লাগে

$$T=\frac{\pi r}{v}=\frac{\pi mc}{BZe} \qquad \cdots \qquad 8{\cdot}3$$

এথেকে দেখা যায় যে T, v ও r এর পরিমাণ নিরপেক্ষ অর্থাৎ আবর্তনকালে ব্যাসার্দ্ধ ও গতিবেগ এমন মাপের হয় যাতে কণাটির অর্দ্ধবৃত্তাকৃতি পথ অতিক্রম করতে প্রত্যেকবার একই সময় লাগে। সুতরাং বিভব বিপরীতায়নের স্পন্দনাঙ্কও এমনভাবে নির্দিষ্ট করা হয় যাতে ঠিক T সময়ের ব্যবধানে পাত্র দুটির বিভবের প্রকৃতি বিপরীত হয়ে যায়, সেক্ষেত্রে কণাটি সবসময়ই ত্বরণের দশায় থাকতে পারে। চৌম্বকক্ষেত্রে কণার আবর্তনের স্পন্দনাঙ্ক অর্থাৎ প্রতি সেকেণ্ডে এটি যতগুলি সম্পূর্ণ বৃত্ত অতিক্রম করে তা 8·3 সম্বন্ধ থেকে পাওয়া যায়

$$\nu=\frac{1}{2T}=\frac{ZeB}{2\pi mc} \qquad \cdots \qquad 8{\cdot}4$$

যদি চৌম্বকক্ষেত্রের তীব্রতা হয় 5000 গস তবে প্রোটনের জন্য এই স্পন্দনাঙ্কের পরিমাণ হবে প্রায় 10^7 সাইকল/সেকেণ্ড, সুতরাং প্রোটনকে ত্বরিত করার জন্য পাত্রদ্বয়ের সঙ্গে যে বিপরীতায়নশীল বিভব উৎসের সংযোগ সাধন করতে হবে তার স্পন্দনাঙ্কও ঠিক এই পরিমাণের হতে হবে।

8·3 সম্বন্ধটি থেকে আমরা পাই

$$v=\frac{ZeBr}{mc} \qquad \cdots \qquad 8{\cdot}5$$

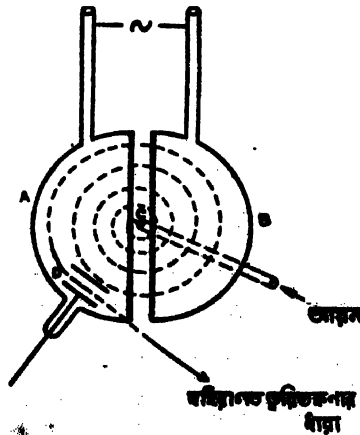
$$\tfrac{1}{2}mv^2=\frac{(Ze)^2B^2r^2}{2mc^2} \qquad \cdots \qquad 8{\cdot}6$$

অর্থাৎ একটি বিশেষ কণা যার আধান এবং ভর নির্দিষ্ট, এর ক্ষেত্রে মোট অর্জিত গতিশক্তির পরিমাণ নির্ভর করবে চৌম্বকক্ষেত্রের তীব্রতার বর্গ এবং চুম্বকের মেরুমুখের ব্যাসার্দ্ধের বর্গের উপর। কিন্তু একটি বিশেষ সাইক্লোটনের ক্ষেত্রে মেরুমুখের ব্যাসার্দ্ধও নির্দিষ্ট, সুতরাং মোট শক্তির পরিমাণ শেষ পর্যন্ত নির্ভর করে চৌম্বকক্ষেত্রের তীব্রতার উপর। 8·4 সম্বন্ধ থেকে আমরা দেখি যে একটি নির্দিষ্ট কণা ও নির্দিষ্ট স্পন্দনাঙ্কের জন্য চৌম্বকক্ষেত্রের তীব্রতার পরিমাণ নির্দিষ্ট রাখতে হবে, 8·4 সম্বন্ধটি পালিত না হলে কণাটির ত্বরণ ঘটতেই পারে না। একটি বিশেষ কণা ও নির্দিষ্ট চৌম্বকক্ষেত্রের তীব্রতার

জন্য যে এইরকম একটি নির্দ্দিষ্ট বিশেষ স্পন্দনাঙ্কের প্রয়োজন হয় তাকে বলা হয় চক্রত্বরক অনুরণন স্পন্দনাঙ্ক। সাধারণতঃ চক্রত্বরকের ভিতর বিভবের স্পন্দনাঙ্কই ধ্রুব রাখা হয়, চৌম্বকক্ষেত্রের তীব্রতার ক্রমশঃ পরিবর্ত্তন ঘটিয়ে অবশেষে 8·4 সম্বন্ধের দ্বারা প্রদত্ত অনুরণন পরিমাণের সমান করা হয় এবং তখনই কণাগুলি চরম শক্তি অর্জ্জন করে। স্পষ্টতঃই, চক্রত্বরক থেকে খুব শক্তিশালী কণা উৎপন্ন করতে হলে এর চুম্বকের মেরুমুখের ব্যাসার্দ্ধ তদনুপাতে বৃহৎ হওয়া প্রয়োজন। লক্ষণীয় যে প্রযুক্ত ত্বরক বিভবের পরিমাণের উপর কণাগুলির প্রান্তিক শক্তির কোন নির্ভরশীলতা নেই।

লরেন্সের প্রথম নির্ম্মাণের পর আরও বহু চক্রত্বরক নির্ম্মিত হয়েছে, অবশ্য এদের সবগুলিতেই লরেন্সের অনুসৃত নীতিই অনুসরণ করা হয়েছে। চক্রত্বরক নির্ম্মাণে প্রধান অসুবিধাগুলি হ'ল যে, প্রথমতঃ এদের জন্য বিশাল আকারের চুম্বক মেরু (50 ইঞ্চি ব্যাস) এবং অত্যধিক তীব্রতাসম্পন্ন চৌম্বক-ক্ষেত্রের (18000 গস) প্রয়োজন হয়। এত বৃহদাকার একটি চুম্বকের জন্য অত্যধিক পরিমাণে বৈদ্যুতিক শক্তি ব্যয়িত হয়; তাছাড়া সাধারণতঃ প্রায় 10^7 সাইকল/সেকেণ্ড এবং 100 কিলোওয়াট ক্ষমতাসম্পন্ন বিভব উৎসের প্রয়োজন হয়। এইগুলি নির্ম্মাণ এবং পরিচালনা খুবই দুরূহ, এজন্য চক্রত্বরক বা ঐজাতীয় যন্ত্র নির্ম্মাণ পারমাণবিক গবেষণার ক্ষেত্রে অন্যতম দুরূহ কাজ হিসাবে স্বীকৃত।

চিত্র 8·10

চক্রত্বরকের আয়োজন : D—দ্বিকোণাকারী বৈদ্যুতিক ক্ষেত্র, C—আয়ন উৎস।

অনুসৃত চক্রত্বরক (Synchrocyclotron)

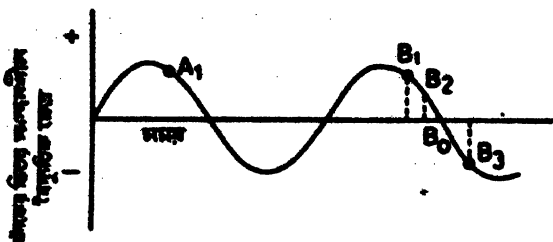
চক্রত্বরক নির্ম্মাণের মূলনীতি হ'ল এই যে, একটি অর্দ্ধবৃত্ত অতিক্রম করতে একটি কণার যে সময় লাগে তা ধ্রুবক, বৃত্তের ব্যাসার্দ্ধ বা কণার গতিবেগের উপর ঐ সময়ের পরিমাণ নির্ভর করে না, যদিও 8·5 সম্বন্ধটি থেকে আমরা দেখি যে T এর পরিমাণ কণাটির ভরের উপর নির্ভরশীল। ত্বরণের ফলে কণাটির গতিবেগ ক্রমশঃ বৃদ্ধি পেতে পেতে একসময় আলোর গতিবেগের নিকটবর্ত্তী হতে পারে, তখন আপেক্ষিকতাতাত্ত্বিক সূত্র অনুযায়ী ভরের পরিমাণও বৃদ্ধি পেতে থাকবে। এই বৃদ্ধির পরিমাণ সম্পূর্ণ অবহেলনীয় যতক্ষণ পর্য্যন্ত $v << c$, কিন্তু যখন গতিবেগের পরিমাণ আলোর গতিবেগের অত্যন্ত নিকটবর্ত্তী হয় তখন ভরের পরিমাণ গতিবেগের সাথে সাথে অত্যন্ত দ্রুত বৃদ্ধি পেতে থাকে। m এর পরিমাণ বৃদ্ধি পেতে থাকলে সাথে সাথে অর্দ্ধবৃত্ত অতিক্রমণের সময় T এর পরিমাণও বৃদ্ধি পাবে। কিন্তু চক্রত্বরণের নীতি সফল হতে হলে T এর পরিমাণ ধ্রুব হওয়া আবশ্যক, কারণ তা না হলে কণার গতি ও পাত্রদ্বয়ের মধ্যে বিভবের বিপরীতায়ন একই দশায় থাকবে না। দশার পরিবর্ত্তন ঘটলে কণাগুলি এমন সময়ে এসে মধ্যবর্ত্তী ফাঁকের ভিতর পৌঁছুতে থাকবে যখন সেখানকার বিভব ব্যবধান আর এদের ত্বরণের পক্ষে সহায়ক নয়। অবশেষে এমন অবস্থায় এসে পৌঁছুবে যখন কণাটি যে মুহূর্ত্তে ফাঁক অতিক্রম করে যাচ্ছে সেই মুহূর্ত্তে ফাঁকের ভিতর বৈদ্যুতিক ক্ষেত্রের তীব্রতা শূন্য থাকছে, তখন এটির শক্তিবৃদ্ধি সম্পূর্ণ বন্ধ হয়ে যাবে।

চক্রত্বরকের এই দুর্ব্বলতার একটি প্রতিবিধান পাওয়া সম্ভব হয়েছে; প্রতিটি অর্দ্ধবৃত্ত অতিক্রম করতে একটি কণা ক্রমশঃ অধিকতর সময় নিতে থাকে, কিন্তু বিভব স্পন্দনের সময়অন্তরও যদি সেই সঙ্গে ক্রমশঃ বর্দ্ধিত ক'রে যাওয়া যায় তবে বেশী সময় নেওয়া সত্ত্বেও কণাটি ঠিক উপযুক্ত দশায় ফাঁকের ভিতরে এসে পৌঁছুবে, অর্থাৎ যখন ফাঁকের ভিতর বিভব ব্যবধান ত্বরণের অনুকূল থাকে। এই নীতি অনুসরণ ক'রে আপেক্ষিকতাত্ত্বিক গতিবেগবিশিষ্ট কণাদের ত্বরণ সম্ভব, এই ধরণের যন্ত্রকে বলা হয় অনুসৃত চক্রত্বরক। এদের কার্য্যপদ্ধতি সাধারণ চক্রত্বরকের কার্য্যপদ্ধতির সঙ্গে সাদৃশ্যপূর্ণ, শুরুতে কণাগুলিকে সাধারণ চক্রত্বরকের নীতি অনুসারেই ত্বরিত করা হয়, পরে গতিবেগের সাথে সাথে ভর বৃদ্ধি পেতে থাকলে ত্বরক বিভবের স্পন্দনাঙ্ক ধীরে ধীরে এমনভাবে হ্রাস করা হয় যাতে কণাগুলি সবসময়ই ত্বরণের দশায় থাকে। যেহেতু এই যন্ত্রের দ্বারা অনেক অধিক শক্তি অর্জ্জন করা সম্ভব, অনুসৃত চক্রত্বরকের চুম্বকের মেরুদ্বয়ের ব্যাস চক্রত্বরকের মেরুর ব্যাসের তুলনায় অধিক হওয়া আবশ্যক।

ক্যালিফোর্ণিয়া বিশ্ববিদ্যালয়ে একটি অনুসৃত চক্রত্বরক নির্ম্মিত হয় যার মেরুর ব্যাস 184 ইঞ্চি এবং এটির সাহায্যে 380 এমইভি আলফাকণা এবং 350 এমইভি প্রোটন উৎপাদন করা সম্ভব হয়েছে। অনুসৃত চক্রত্বরকের দ্বারা উৎপন্ন শক্তিশালী প্রোটনের দ্বারাই সর্ব্বপ্রথম পরীক্ষাগারে কৃত্রিম উপায়ে পাই মেসন সৃষ্টি করা সম্ভব হয়েছিল (দ্বাদশ অধ্যায় দ্রষ্টব্য)।

অনুসৃত চক্রত্বরকে ত্বরণের এই ক্রিয়াকল্প যে সাফল্যজনকভাবে প্রযুক্ত হতে পারে তার মূলে আছে গতি-বিজ্ঞানের একটি নীতি, এর নাম দশা-স্থিরতা নীতি। এই নীতিটি কার্য্যকরী থাকে ব'লেই উপরোক্ত পদ্ধতিতে ত্বরণ সম্ভব হয়। ভেক্‌স্‌লার (Veksler) এবং ম্যাকমিলন (Mckmillan) আবিষ্কৃত এই নীতি অনুযায়ী অনুসৃত চক্রত্বরকে কণার শক্তিবৃদ্ধির হার স্বয়ংক্রিয়ভাবে বিভবের স্পন্দনাঙ্ক হ্রাসের হারকে অণুসরণ করে, অর্থাৎ উভয়ের মধ্যে দশার কিছু পার্থক্য ঘটলে তা আপনা থেকেই সংশোধিত হয়ে যায়। দশা-স্থিরতার অস্তিত্ব ত্বরণযন্ত্র নির্ম্মাণের ক্ষেত্রে একটি অন্যতম তাৎপর্য্যপূর্ণ আবিষ্কার। এর প্রয়োগের দ্বারাই অধিকাংশ আধুনিক ত্বরণযন্ত্র নির্ম্মাণ সম্ভব হয়েছে এজন্য এ বিষয়ে বর্ত্তমানে আমরা একটু বিস্তৃতভাবে আলোচনা করব।

ধরা যাক একটি কণাকে ত্বরিত করা হচ্ছে ; যখন গতিবেগ আপেক্ষিকতা-স্তরের অনেক নিম্নে তখন কণাটির কৌণিক গতিবেগ ধ্রুব এবং এটি নির্দ্দিষ্ট ধ্রুব সময়অন্তর পর পর ত্বরণ সৃষ্টিকারী ফাঁকটি অতিক্রম করে। এই সময় ত্বরক বিভবের স্পন্দনাঙ্ক ধ্রুব থাকে, সমস্ত অবস্থাটি 8·11 চিত্রের সাহায্যে বোঝা যাবে। প্রথমবার যখন কণাটি ফাঁক (accelerating gap) অতিক্রম করে সেই অবস্থায় ফাঁকের ভিতর বিভবের পরিমাণ A_1 বিন্দুর দ্বারা নির্দ্দেশিত, এক ত্বরণচক্র অতিক্রমের পর পুনরায় যখন কণাটি ফাঁকের ভিতর এসে উপস্থিত হয় তখন সেখানে বিভবের পরিমাণ B_1 বিন্দুর দ্বারা নির্দ্দেশিত, দুই ক্ষেত্রেই ত্বরক বিভবের পরিমাণ সমান এবং এদের মধ্যে বিভব স্পন্দনের ঠিক এক সময়অন্তর (time period) অতিক্রান্ত হয়েছে। যদি কণাটির কৌণিক গতিবেগ এবং বিভব বিপরীতায়নের স্পন্দনাঙ্ক ধ্রুব থাকে তবে প্রতিচক্রেই এটি একই দশায় এসে ফাঁকের ভিতর পৌঁছুতে থাকবে এবং প্রতিবারই সমান পরিমাণ শক্তি অর্জ্জন করতে থাকবে। কিন্তু কণাটি ক্রমশঃ শক্তি সঞ্চয় করতে থাকলে শেষ পর্য্যন্ত যদি এর গতিবেগ আপেক্ষিকতা স্তরের গতিবেগে পরিণত হয় তবে ভরের বৃদ্ধি ঘটার জন্য এর কৌণিক গতিবেগ হ্রাস পায় এবং এজন্য পরবর্ত্তী বার এটি ফাঁকে এসে পৌঁছুবে B_1-এর বদলে B_2 বিন্দুর দশায় এবং এবার এটি যে শক্তি অর্জ্জন

করবে অর পরিমাণও হবে কিছু কম। এই অবস্থার প্রত্যেক বারেই কণাটির শক্তিবৃদ্ধির হার ক্রমশঃ হ্রাস পেতে থাকবে এবং শেষ পর্য্যন্ত এটি B_0 বিন্দুর দশায় এসে পৌঁছুবে যখন শক্তি অর্জ্জনের পরিমাণ হয় শূন্য।

চিত্র ৪.11 ঃ দশা-স্থিরতা নীতির বিশ্লেষণ।

দশার আরও কিছু ব্যতিক্রম ঘটলে অবশেষে B_3 অবস্থায় এসে উপস্থিত হতে পারে, তখন ফাঁকটি অতিক্রম করার সময় কণাটি প্রতিত্বরণশীল বিভবের সম্মুখীন হবে এবং এর শক্তি হ্রাস পাবে। শক্তি হ্রাস পাওয়ার অর্থ অবশ্য যে, এর ফলে এর ভরের পরিমাণ সামান্য হ্রাস পাবে এবং ফলে শেষ পর্য্যন্ত কণাটির কৌণিক গতিবেগ সামান্য বৃদ্ধি পাবে। এর দ্বারা কণাটির গতির দশা ক্রমশঃ B_0 বিন্দুর দিকে ফিরে যেতে থাকবে। সুতরাং B_0 দশাই হ'ল কণাটির স্থির দশা, এই অবস্থায় এটি আর কোন শক্তি অর্জ্জন না ক'রে নির্দিষ্ট কক্ষে আবর্ত্তিত হতে থাকে; সুতরাং গতির দশায় কিছু পরিবর্ত্তন ঘটলে এই দশা B_0 বিন্দুর পরিপ্রেক্ষিতে স্পন্দিত হতে থাকে এবং কণাগুলি সবসময়ই B_0 বিন্দুর দ্বারা নির্দ্দেশিত দশা-স্থির (phase stable) কক্ষপথে এসে জড়ো হয়।

এইবার আমরা উপরোক্ত দশা-স্থির কক্ষপথের ধারণার সাহায্য নিয়ে অনুসৃত ত্বরকের ত্বরণ পদ্ধতি বিশ্লেষণ করতে পারি। ধরা যাক কণাটি পূর্ব্বোক্ত একটি স্থির দশা সমন্বিত কক্ষপথে অবস্থান ক'রে আবর্ত্তিত হচ্ছে, এই অবস্থায় যদি রেডিও স্পন্দিত বিভবের স্পন্দনাঙ্ক সামান্য কমিয়ে দেওয়া যায় তবে কণাটির কৌণিক গতিবেগ ঐ নূতন স্পন্দনাঙ্কের তুলনায় অতিরিক্ত হবে এবং কণাটি ফাঁকের ভিতর খানিকটা আগে (যেমন B_2 বিন্দুতে) এসে পৌঁছুবে, সুতরাং এই অবস্থায় কণাটি শক্তি অর্জ্জন করতে থাকবে যতক্ষণ পর্য্যন্ত না এর আবর্ত্তনের স্পন্দনাঙ্ক বৈদ্যুতিক ক্ষেত্রের নূতন স্পন্দনাঙ্কের সমান হয়। তখন অধিকতর নূতন অর্জ্জিত শক্তিতে এটি পুনরায় একটি দশা-স্থির কক্ষে এসে পৌঁছুবে। বিভব স্পন্দনের স্পন্দনাঙ্ক

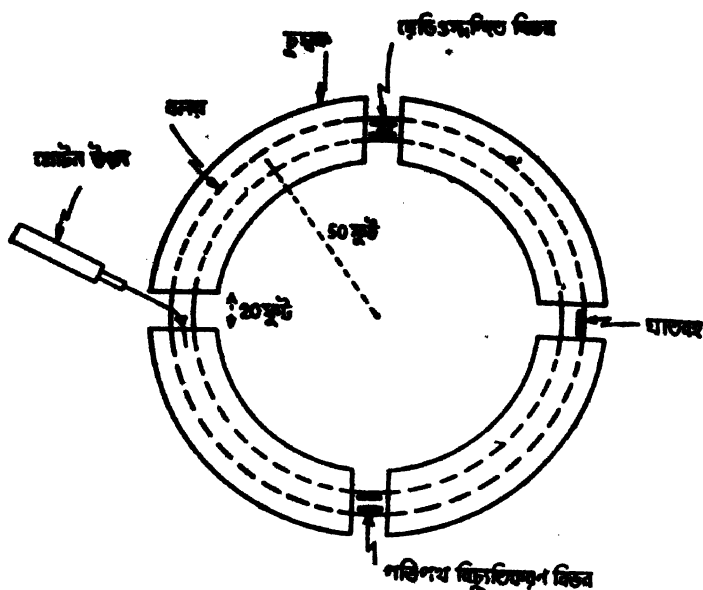
যদি খুব ধীরে ধীরে সন্ততভাবে কমিয়ে আনা যায় তাহলে এভাবে কণাটির কৌণিক গতির স্পন্দনাঙ্ক বিভবের স্পন্দনাঙ্ককে অনুসরণ করে এবং এর ফলে এটি ক্রমশঃ অধিকতর শক্তি অর্জ্জন করতে থাকে।

বাস্তবক্ষেত্রে একটি সঞ্চয়ককে (condenser) ধীরে ধীরে ঘুরিয়ে বিভবের স্পন্দনাঙ্ক হ্রাস করা হয়, ঠিক কিভাবে স্পন্দনাঙ্কের পরিবর্ত্তন ঘটে সেটা ততটা তাৎপর্য্যপূর্ণ নয় যতক্ষণ পর্য্যন্ত তা যথেষ্ট ধীরে ধীরে ঘটে। চরম ত্বরকবিভবের পরিমাণ থাকে অপেক্ষাকৃত কম, সাধারণতঃ 15 কিলোভোল্ট, এজন্য চরম শক্তিতে পৌঁছুতে আবর্ত্তনের সংখ্যা চক্রত্বরকের তুলনায় হয় অনেক বেশী। অনুসৃত চক্রত্বরক গোছায় গোছায় ত্বরিত কণা উৎপন্ন করে, প্রতি সেকেণ্ডে প্রায় 60টি ত্বরণচক্র চলে, প্রতিটি চক্রেই কণাগুলিকে শুরু থেকে চরমশক্তি অবস্থা পর্য্যন্ত ত্বরিত করা হয়, তারপর পরবর্ত্তী চক্রে আবার নূতন কণা নিয়ে নূতনভাবে ত্বরণকার্য্য শুরু হয়।

প্রোটন অনুসৃত ত্বরক (proton syncrotron)

প্রোটন অনুসৃত ত্বরকের ত্বরণ পদ্ধতির নীতি অনুসৃত চক্রত্বরকের অনুরূপ যদিও এদের উভয়ের গঠন স্বতন্ত্র। অনুসৃত চক্রত্বরকে সমগ্র শূন্যাধারটি একটি বিশালাকার চুম্বকের মেরুদ্বয়ের মাঝখানে থাকে এবং কণাগুলির সর্ব্বোচ্চ শক্তি বৃদ্ধি করতে হলে মেরুর ব্যাসও সেই অনুপাতে বাড়াতে হবে এবং সেইসব চুম্বকের জন্য খরচ হবে অস্বাভাবিক। এইসব কারণে এক বিইভির অধিক শক্তিবিশিষ্ট প্রোটন অনুসৃত চক্রত্বরকে উৎপন্ন করা সম্ভব নয়। প্রোটন অনুসৃত ত্বরকে যে শূন্যাধারটির ভিতর ত্বরণ ঘটে এর আকৃতি একটি বৃত্তাকার নল বা ফাঁপা বলয়ের মত, এবং এই বলয় রিং আকৃতির একটি চুম্বকের মেরুদ্বয়ের মাঝখানে থাকে। এই বলয়ের ফাঁপা অভ্যন্তরের ব্যাস অপেক্ষাকৃত অনেক কম, এজন্য যে মেরুদ্বয়ের মাঝখানে এটি থাকে তাদের বিস্তারও যথেষ্ট কম এবং এই চুম্বককে সচল রাখার খরচও সেজন্য খুব বেশী হয় না। অনুসৃত ত্বরকে বলয়ের অভ্যন্তরে আবর্ত্তনশীল প্রোটনের কক্ষপথের ব্যাসার্দ্ধ নির্দ্দিষ্ট থাকে এবং এই বৃত্তীয় গতিপথের মাঝে এক বা একাধিক ফাঁক থাকে (8·12 চিত্র) যেখানে স্পন্দনশীল বৈদ্যুতিক ক্ষেত্রের দ্বারা কণাগুলি ত্বরিত করা যায়। আবর্ত্তনশীল প্রোটনের শক্তি যত বৃদ্ধি পেতে থাকে চৌম্বকক্ষেত্রের তীব্রতাও সেই অনুপাতে বাড়ান হতে থাকে, যাতে কণাগুলি যেকোন শক্তিতেই ঠিক একই নির্দ্দিষ্ট ব্যাসার্দ্ধে আবর্ত্তিত হয়। আবার যেহেতু প্রোটনের গতিবেগ ক্রমশঃ বাড়তে থাকে, স্পন্দনশীল বৈদ্যুতিক

ক্ষেত্রের স্পন্দনাঙ্ক ধীরে ধীরে বাড়াতে হয় যাতে কণাগুলি সবসময়েই ত্বরণের দশায় থাকে। এই দুই প্রক্রিয়া পরস্পরের সঙ্গে সামঞ্জস্যপূর্ণভাবে করতে হবে যাতে কণাগুলির শক্তি বৃদ্ধি পায় অথচ গতিপথের ব্যাসার্ধ অপরিবর্তিত থাকে। চৌম্বকক্ষেত্রের তীব্রতা ঠিক হারে বাড়াতে না পারলে গতিপথের ব্যাসার্ধ হয় কমে নতুবা বেড়ে যেতে পারে এবং কণাগুলি তখন শূন্যাধারের দেওয়ালে গিয়ে আঘাত ক'রে নষ্ট হয়ে যেতে পারে।

চিত্র 8·12

ক্যালিফোর্নিয়া বিশ্ববিদ্যালয়ের প্রোটন অনুসৃত ত্বরক। ত্বরিত প্রোটনের চরম-শক্তি 6 বিইভি, প্রোটনের গতিপথের ব্যাসার্ধ 50 ফুট, চুম্বকের ওজন 10,000 টন। এক সেকেণ্ডের মধ্যে চুম্বকের বিদ্যুৎপ্রবাহ শূন্য থেকে শুরু ক'রে 8,300 এ্যাম্পিয়ার পর্যন্ত বৃদ্ধি পায়। যন্ত্রে প্রবেশ করানর পূর্বে প্রোটনগুলিকে সরলরৈখিক ত্বরকের ভিতর 10 এমইভি শক্তিতে ত্বরিত ক'রে নেওয়া হয়।

বাস্তবিকপক্ষে প্রোটন অনুসৃত ত্বরকে উপরোক্ত পদ্ধতিতে ত্বরণ সম্ভব হয় তার কারণ এক্ষেত্রেও দশা-স্থিরতা নীতি কার্য্যকরী, তবে এক্ষেত্রে এই নীতির পর্য্যালোচনা আরও কঠিন কারণ এই যন্ত্রে চৌম্বকক্ষেত্রের তীব্রতাও একই সঙ্গে পরিবর্তিত হতে থাকে। তবে গাণিতিক বিশ্লেষণের দ্বারা দেখান যায় যে কণাটির গতি চৌম্বকক্ষেত্রের তীব্রতার পরিবর্তন ও বৈদ্যুতিক বিভবের স্পন্দনাঙ্কের পরিবর্তনকে অনুসরণ ক'রে, অর্থাৎ সবসময়েই কণাটি শক্তি সঞ্চয়ের দশায় থেকে নির্দিষ্ট ক্রম ব্যাসার্ধবিশিষ্ট কক্ষপথে অবস্থান ক'রে

স্থানান্তরিত হতে পারে। প্রোটন অনুসৃত ত্বরকে গতিপথের দৈর্ঘ্য নির্দিষ্ট এবং কণাটির কৌণিক গতিবেগ ক্রমশঃ বৃদ্ধি পেতে থাকে, কারণ অন্ততঃ 4 বিইভি শক্তিতে (প্রোটনের গতিবেগ 0·98c) না পৌঁছান পর্য্যন্ত প্রোটনের গতিবেগ আলোর গতিবেগের নিকটবর্ত্তী হয় না। এজন্য এক্ষেত্রে স্পন্দনশীল বিভবের স্পন্দনাঙ্কও ক্রমশঃ বাড়িয়ে যেতে হয় অর্থাৎ এখানে নীতিটি অনুসৃত চক্রত্বরকের বিপরীত। কণার শক্তিবৃদ্ধির হার, চৌম্বকক্ষেত্রের তীব্রতাবৃদ্ধির হার এবং বৈদ্যুতিক ক্ষেত্রের স্পন্দনাঙ্ক বৃদ্ধির হার, এদের মধ্যে যদি কোন অসামঞ্জস্যের অভাব ঘটে তবে দশা-স্থিরতা নীতি ক্রিয়াশীল থাকায় যন্ত্রের ভিতর স্বয়ংক্রিয়ভাবেই ঐ ত্রুটি সংশোধিত হয়। দশা-স্থিরতা নীতি শুধু আপেক্ষিকতাতত্ত্বের গতিবেগবিশিষ্ট কণাগুলির ক্ষেত্রেই কার্য্যকরী এজন্য অনুসৃত ত্বরকে পাঠানর আগে প্রোটনকে সাধারণতঃ অপর কোন ত্বরণযন্ত্রে যথোপযুক্ত শক্তিতে ত্বরিত ক'রে নেওয়া হয়। মূলতঃ প্রোটন অনুসৃত ত্বরকের নীতি অনুসরণ ক'রে আমেরিকার বাটাভিয়াতে অতিসম্প্রতি একটি যন্ত্র নির্ম্মিত হয়েছে যেখানে প্রোটনকে 200 বিইভি শক্তিতে ত্বরিত করা সম্ভব হয়েছে।

ইলেকট্রন অনুসৃত ত্বরক (electron syncrotron)

ইলেকট্রনকে সাইক্লোট্রন যন্ত্রে ত্বরিত করা হয় না তার কারণ অপেক্ষাকৃত সামান্য শক্তিতেই এর গতিবেগ আপেক্ষিকতাতত্ত্বের গতিবেগে পৌঁছে যায়। অনুসৃত চক্রত্বরকের পদ্ধতিও ব্যবহার করা সম্ভব নয়। 8·4 সূত্রে যদি আপেক্ষিকতাতত্ত্বের ভরের পরিমাণ ব্যবহার করা যায় তবে আমরা পাই

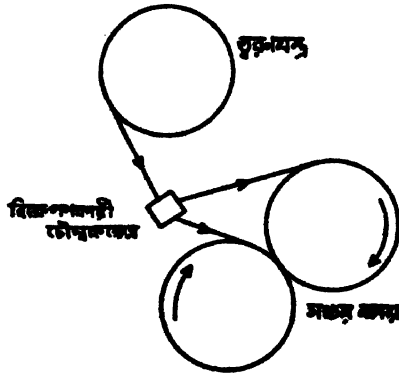
$$2\pi\nu = w = \frac{BZe}{m_0 c}(1 - v^2/c^2)^{\frac{1}{2}} \qquad \cdots \qquad 8{\cdot}7$$

অর্থাৎ আপেক্ষিকতাতত্ত্বের শক্তিতে গতিবেগের বৃদ্ধির সাথে সাথে কৌণিক গতিবেগের পরিমাণ হ্রাস পেতে থাকে, ইলেকট্রনকে 0 থেকে 100 এমইভি শক্তিতে ত্বরিত করলে এর ভরের পরিবর্ত্তন হয় প্রায় 200 গুণ, সুতরাং অনুসৃত চক্রত্বরক পদ্ধতি ব্যবহার করলে বিভবের স্পন্দনাঙ্কও 200 গুণ কমিয়ে আনতে হবে যা বাস্তবক্ষেত্রে প্রায় অসম্ভব। অপর একভাবেও অবশ্য কৌণিক গতিবেগ বৃদ্ধি করা যায়, তা হ'ল চৌম্বকক্ষেত্র B-এর তীব্রতা বৃদ্ধি করা, ইলেকট্রন অনুসৃত ত্বরকে ঐ পদ্ধতিই ব্যবহৃত হয়। 2 এমইভির অধিক শক্তিতে ইলেকট্রনের গতিবেগ প্রায় আলোর গতিবেগের সমান এবং এর আবর্ত্তনের স্পন্দনাঙ্ক ধ্রুব থাকে এজন্য বিভবের স্পন্দনাঙ্কের পরিমাণ এই যন্ত্রে ধ্রুব রাখা হয়। ইলেকট্রনের শক্তি বৃদ্ধি পেতে থাকলে এদেরকে

নির্দিষ্ট কক্ষপথে আটকে রাখা যায় (অর্থাৎ এদের কৌণিক গতিবেগ নির্দিষ্ট রাখা যায়) যদি ভরের বৃদ্ধির আনুপাতিকভাবে চৌম্বকক্ষেত্রের তীব্রতা বৃদ্ধি ক'রে যাওয়া যায়। ইলেকট্রন অনুসৃত ত্বরকে ত্বরণের পূর্ব্বে ইলেকট্রনগুলিকে অন্য কোন উপায়ে আপেক্ষিকতাস্তরের শক্তিতে ত্বরিত ক'রে নেওয়া হয়। ঠিক প্রোটন অনুসৃত ত্বরকের মতই ফাঁপা বলয়াকৃতি আধারের ভিতর ইলেকট্রনের ত্বরণ ঘটে, চৌম্বকক্ষেত্র শুধু ঐ বলয়াকৃতি অঞ্চলের মধ্যেই সীমাবদ্ধ থাকে এজন্য চুম্বকের আকার এবং খরচ অনেক কম হয়, এক্ষেত্রেও দশা-স্থিরতা নীতি কার্য্যকরী থাকার দরুণ ত্বরণ সম্ভব হয়। বহুসংখ্যক ইলেকট্রন অনুসৃত ত্বরক নির্ম্মিত হয়েছে, এদের দ্বারা 500 এমইভি শক্তির ইলেকট্রন উৎপন্ন করা সম্ভব।

সঞ্চয় বলয় (Storage ring)

অতি শক্তিশালী কণা উৎপাদন এবং এগুলিকে বহুক্ষণ ধরে সঞ্চয় ক'রে রাখার জন্য বর্ত্তমানে সঞ্চয় বলয় নির্ম্মাণের প্রচলন হয়েছে। এই বলয়গুলির

চিত্র 8·13
দুই পরস্পরচ্ছেদী সঞ্চয় বলয়ের আয়োজন।

গঠন অনেকটা অনুসৃত ত্বরকের মত। সঞ্চয়ের জন্য কণাগুলিকে কোন প্রকারের ত্বরণযন্ত্রে উচ্চশক্তিতে ত্বরিত ক'রে পরে এই বলয়ের ভিতর প্রবেশ করিয়ে দেওয়া হয়, বলয়টির উপর ধ্রুব চৌম্বকক্ষেত্র বর্ত্তমান থাকে এবং এর প্রভাবে কণাগুলি নির্দিষ্ট কক্ষপথে আবর্ত্তিত হতে থাকে। দীর্ঘ সময় যাবৎ বলয়ের ভিতর ক্রমাগত কণা প্রবেশ করিয়ে ধীরে ধীরে কণাপ্রবাহের তীব্রতা বাড়ান হয়, এইভাবে খুব অল্প সময়ের মধ্যেই কণাপ্রবাহের পরিমাণ একশ' এ্যাম্পিয়ার পর্য্যন্ত ওঠান যায় এবং অত্যধিক তীব্রতাসম্পন্ন কণাপ্রবাহ সঞ্চয় বলয়ের ভিতর

কয়েক ঘণ্টা পর্য্যন্ত আবর্ত্তনশীল অবস্থায় জমিয়ে রাখা যায়। কণাগুলি ধ্রুব চৌম্বকক্ষেত্রের ভিতর ধ্রুবশক্তিতে আবর্ত্তনশীল অবস্থায় সঞ্চিত থাকে, কিন্তু বৃত্তীয় গতিপথের দরুণ ত্বরণের ফলে এদের ক্রমাগত শক্তিক্ষয় হতে থাকে। এই শক্তিক্ষয় রোধ করার জন্য সঞ্চয় বলয়ের ভিতর এক বা একাধিক ফাঁক রাখা হয় যাদের ভিতর স্পন্দনশীল বৈদ্যুতিক ক্ষেত্রের অস্তিত্বের দরুণ কণাগুলি কিয়ৎপরিমাণে শক্তিপ্রাপ্ত হয় যা এদের ত্বরণবিকিরণজাত শক্তিক্ষয়ের পরিপূরক হিসাবে কাজ করে। এক্ষেত্রে অবশ্য বৈদ্যুতিক ক্ষেত্রের স্পন্দনাঙ্ক হয় নির্দিষ্ট ধ্রুব পরিমাণের, এর কাজ শুধু কণাগুলিকে নির্দিষ্ট কক্ষে নির্দিষ্ট শক্তিতে বজায় রাখতে সাহায্য করা। দুটি সঞ্চয় বলয়কে পাশাপাশি রেখে এদের ভিতরের প্রবাহদ্বয়কে পরস্পরের উপর আপতিত করিয়ে বিচ্ছুরণের পরীক্ষা করা সম্ভব। 8·13 চিত্রের ছকের সাহায্যে এই ধরণের একটি আয়োজন বর্ণনা করা হয়েছে। একটি ত্বরণযন্ত্রের মধ্য থেকে উচ্চশক্তিসম্পন্ন কণাগুলি দুটি পাশাপাশি অবস্থিত সঞ্চয় বলয়ের মধ্যে ক্রমান্বয়ে চালিত ক'রে এদের উভয়ের মধ্যে আবর্ত্তনশীল তীব্রশক্তিসম্পন্ন কণাপ্রবাহ সৃষ্টি করা যেতে পারে। এই কণাপ্রবাহদ্বয় বলয় দুটির একটি সাধারণ বিন্দুতে এসে সংঘর্ষ ঘটায়, এই সংঘর্ষ ঘটে দুই বৃত্তের সাধারণ স্পর্শক বরাবর। এই ধরণের একাধিক সঞ্চয় বলয়ের আয়োজন নির্ম্মিত হয়েছে, এদের মধ্যে একটি হচ্ছে আমেরিকার স্টান্‌ফোর্ডে ইলেকট্রনের জন্য 500 এমইভি সঞ্চয় বলয় এবং আরেকটি সোভিয়েট সংঘের নভোসিবিরস্কে 130 এমইভি ইলেকট্রন সঞ্চয় বলয়। ইউরোপীয় গবেষণা সংস্থার অধীনে জেনেভাতে প্রোটনের জন্য এরকম সঞ্চয় বলয় নির্ম্মিত হয়েছে।

একটি ত্বরিত কণার দ্বারা স্থির ঘাতবহের উপর ঘটান একটি বিক্রিয়ায় কতটা ভরকেন্দ্রিক শক্তি প্রাদুর্ভূত হয় তা সহজেই নির্ণয় করা যায়। ধরা যাক একটি কণা যার স্থির ভর m_1 এবং গতিশক্তি T_1, অপর একটি স্থির কণার উপর আপতিত হচ্ছে যার স্থির ভর m_2। সহজেই দেখান যায় যে এই ক্ষেত্রে ভরকেন্দ্রের পরিপ্রেক্ষিতে কণাদ্বয়ের মোট শক্তির পরিমাণ হবে

$$W_{CM} = [2m_2c^2(T_1 + m_1c^2) + m_1^2c^4 + m_2^2c^4]^{\frac{1}{2}} \quad \cdots \quad 8·8$$

এই রাশির মান সবসময়ই গবেষণাগারের কাঠামোর পরিপ্রেক্ষিতে মোট শক্তির পরিমাণ $W_L = T_1 + m_1c^2 + m_2c^2$এর তুলনায় কম, এবং T_1-এর পরিমাণ যত অধিক হয় এদের মধ্যে পার্থক্য তত বৃদ্ধি পায়। ভরকেন্দ্রের পরিপ্রেক্ষিতে আরও অনেক বেশী শক্তি পাওয়া সম্ভব হয় যদি ত্বরিত কণাটিকে দিয়ে কোন স্থির ঘাতবহের উপর আঘাত না করিয়ে অপর একটি শক্তিশালী

প্রবাহধারার সঙ্গে সংঘর্ষ ঘটান হয় যেটি এর বিপরীত দিক থেকে অগ্রসর হচ্ছে। যদি প্রবাহধারা দুটি একইপ্রকার কণার দ্বারা গঠিত হয় এবং এদের ভিতর কণাগুলির শক্তিও অভিন্ন হয় তবে ভরকেন্দ্র এবং ল্যাবরেটরী কাঠামোর সেক্ষেত্রে হবে অভিন্ন এবং W হবে ঐ দুইপ্রকার কণার শক্তির যোগফল। ধরা যাক, বিপরীত দিক থেকে আসা এরকম দুটি আঘাতকারী কণাপ্রবাহধারা যাদের ভিতর প্রতিটি কণার স্থির শক্তি mc^2 এবং গতিশক্তি T ; এক্ষেত্রে মোট ভরকেন্দ্রিক শক্তির পরিমাণ

$$W = 2(mc^2 + T) \qquad \cdots \qquad 8{\cdot}9$$

এখন দেখা যাক, একটি সাধারণ ত্বরণযন্ত্রের মধ্য থেকে কত শক্তিসম্পন্ন কণা প্রয়োজন যার দ্বারা স্থির ধাতবহের উপর আঘাতে ঠিক ঐ একই পরিমাণের ভরকেন্দ্রিক শক্তি প্রাদুর্ভূত থাকবে। যদি 8·9 প্রকাশনটিকে আমরা 8·8 সমীকরণের প্রকাশনটির সঙ্গে অভিন্ন ধরি (এবং $m_1 = m_2 = m$) তবে আমরা পাই

$$T_1 = 2T(T/mc^2 + 2) \qquad \cdots \qquad 8{\cdot}10$$

সুতরাং T_1, T-এর বর্গের অপেক্ষক এবং এর মান T এর তুলনায় অত্যধিক বেশী পরিমাণের হতে পারে। উদাহরণ হিসাবে, বিপরীত দিক থেকে আসা দুটি প্রোটন প্রবাহের প্রত্যেকটিতে প্রোটনের শক্তি যদি 6 বিইভি হয়, তবে ঐ বিক্ষুরণ হবে স্থির প্রোটন ধাতবহের উপর 100 বিইভি প্রোটনের বিক্ষুরণের সমতুল্য। যদি প্রোটনের শক্তি হয় 35 বিইভি তবে তা হবে 2751 বিইভি প্রোটনের বিক্ষুরণের সমতুল্য। বিপরীতমুখী সংঘর্ষকারী কণাপ্রবাহ প্রয়োগ ক'রে এমন ভরকেন্দ্রিক শক্তি অর্জন করা যায় যা অদূর ভবিষ্যতে সাধারণ ত্বরণযন্ত্রগুলির সাহায্যে পাওয়া সম্ভব হবে না। এই ধরণের বিক্ষুরণের পরীক্ষায় অত্যুচ্চ ভরকেন্দ্রিক শক্তি অঞ্চলে বিক্ষুরণের প্রকৃতি জানা যাবে।

ইলেকট্রন ও এর প্রতীপকণা পজিট্রনকে একই সঞ্চয় বলয়ের মধ্যে সঞ্চিত ক'রে রাখা যায়। একই সঞ্চয় বলয়ের ভিতর একই কক্ষপথে এরা পরস্পরের বিপরীত দিকে আবর্তনশীল অবস্থায় থাকে, তখন সমগ্র কক্ষপথের মধ্যেই ঐ দুইপ্রকার কণার সংঘর্ষ ঘটতে পারে। এই পদ্ধতি শুধু এপর্যন্ত e^+ এবং e^- কণাদ্বয়ের ক্ষেত্রেই প্রযুক্ত হয়েছে। সংঘর্ষকারী প্রবাহের ভিতর কণার ঘনত্বের পরিমাণ অতি অল্প হওয়ার দরুণ সঞ্চয় বলয়ের দ্বারা বিক্ষুরণের পরীক্ষায় কতগুলি বাস্তব অসুবিধা আছে, প্রতি একক সময় পিছু এক্ষেত্রে সংঘর্ষের সংখ্যা খুবই কম হয়। এই অসুবিধা কোন কঠিন বা তরল ধাতবহের ক্ষেত্রে দেখা দেয় না।

বিটাত্বরক (Betatron)

ফ্যারাডের আবিষ্কৃত তাড়িৎচুম্বকীয় আবেশের তত্ত্ব থেকে আমরা জানি যে কোন একটি অঞ্চলে চৌম্বকক্ষেত্রের তীব্রতা দ্রুত পরিবর্ত্তিত হতে থাকলে সেই অঞ্চলে চৌম্বকক্ষেত্রের সঙ্গে লম্বভাবে বৈদ্যুতিক ক্ষেত্র উৎপন্ন হয়। যদি একটি বৃত্তাকার অঞ্চলে চৌম্বকক্ষেত্রের তীব্রতা দ্রুত পরিবর্ত্তিত হতে থাকে তবে সৃষ্ট বৈদ্যুতিক ক্ষেত্রের জন্য আমরা নিম্নলিখিত সম্বন্ধটি পাই

$$2\pi RE = -\frac{1}{c}\frac{d\phi}{dt} \qquad 8{\cdot}11$$

এখানে R ঐ চৌম্বকক্ষেত্রের অভ্যন্তরস্থ কোন একটি বৃত্তের ব্যাসার্দ্ধ যার পরিধির উপর বৈদ্যুতিক ক্ষেত্রের তীব্রতা E। ϕ ঐ বৃত্তের অভ্যন্তরস্থ মোট চৌম্বকপ্রাবল্য

$$\phi = \pi R^2 \overline{B}$$

$\overline{B}$ ঐ বৃত্তের অভ্যন্তরস্থ একক ক্ষেত্রফলপিছু চৌম্বকক্ষেত্রের গড় তীব্রতার পরিমাণ, $\frac{d\phi}{dt}$ বৃত্তের অভ্যন্তরে চৌম্বকপ্রাবল্যের পরিবর্ত্তনের হার নির্দ্দেশ করে। যদি একটি ইলেকট্রনকে এই ধরণের পরিবর্ত্তনশীল চৌম্বকক্ষেত্রের ভিতর ছেড়ে দেওয়া হয় তবে চৌম্বকক্ষেত্রের প্রভাবে এটি বৃত্তাকার পথে আবর্ত্তিত হতে থাকবে এবং সেইসঙ্গে উৎপন্ন বৈদ্যুতিক ক্ষেত্রের প্রভাবে ক্রমশঃ শক্তি সঞ্চয় করবে। যেসব যন্ত্রে এই পদ্ধতি অনুসরণ ক'রে ইলেকট্রনকে ত্বরিত করা হয় তাদের বলা হয় বিটাত্বরক।

8·13 চিত্রে একটি বিটাত্বরকের আয়োজনের লম্বালম্বি প্রস্থচ্ছেদ দেখান হয়েছে। চুম্বকের উত্তর ও দক্ষিণ মেরু মুখোমুখি অবস্থান করে এবং প্রান্তের দিকে এসে মেরুতলদ্বয়ের মধ্যে ব্যবধান ক্রমশঃ বৃদ্ধি পায়। একটি রিং আকৃতির বায়ুশূন্য নল মেরুদ্বয়ের মাঝখানে বসান থাকে, এইটিই হ'ল শূন্যাধার যার ভিতর ইলেকট্রনগুলির ত্বরণ ঘটে। বিটাত্বরকের কার্য্যপদ্ধতি এমন যাতে ইলেকট্রনগুলি সবসময়ই এই শূন্যাধারের ভিতর একটি নির্দ্দিষ্ট ব্যাসার্দ্ধবিশিষ্ট কক্ষপথে অবস্থান ক'রে ত্বরিত হতে পারে, অর্থাৎ চৌম্বক ক্ষেত্রপ্রাবল্যের পরিবর্ত্তনের হার এবং কক্ষপথের উপর চৌম্বকক্ষেত্রের তীব্রতার পরিবর্ত্তনের হারের মধ্যে নির্দ্দিষ্ট সম্বন্ধ থাকতে হবে যাতে কণাগুলি কখনই নির্দ্দিষ্ট কক্ষের বাইরে চলে না যেতে পারে। বৈদ্যুতিক ক্ষেত্রে ত্বরণের ফলে ভরবেগ পরিবর্ত্তনের হার হবে

$$\frac{dp}{dt} = -eE = \frac{eR}{2c}\frac{d\overline{B}}{dt} \qquad 8{\cdot}12$$

এখানে p কণাটির আপেক্ষিকতাতত্ত্ব প্রদত্ত ভরবেগ

$$p=\frac{m_0v}{\sqrt{1-v^2/c^2}}$$

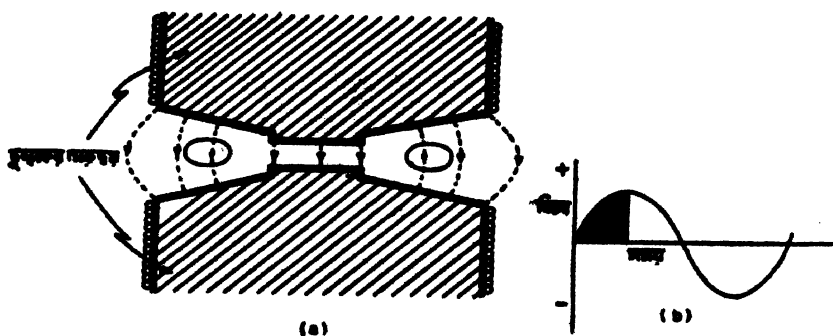
ধরা যাক ইলেকট্রন কক্ষের উপর চৌম্বকক্ষেত্রের তীব্রতার পরিমাণ B, সুতরাং ইলেকট্রনের বৃত্তাকার পথে আবর্তনের সূত্র হবে

$$p=\frac{eRB}{c}$$

e, R ধ্রুবক, সুতরাং এ অবস্থায় p শুধু B-এর উপর নির্ভরশীল এবং ভরবেগের পরিবর্তনের হার নিম্নলিখিত উপায়ে লেখা যায়

$$\frac{dp}{dt}=\frac{eR}{c}\frac{dB}{dt} \quad \cdot \quad 8\cdot13$$

এবার 8·12 সমীকরণের সঙ্গে তুলনা করলে আমরা পাই

$$\frac{d\overline{B}}{dt}=\frac{2dB}{dt} \quad \cdot \quad 8\cdot14$$

চিত্র 8·14

এথেকে বোঝা যায় যে, স্থির আবর্তনশীল কক্ষ পেতে হলে এর অভ্যন্তরে গড় চৌম্বকক্ষেত্রের পরিবর্তনের হার কক্ষের পরিধির উপর চৌম্বকক্ষেত্রের তীব্রতার পরিবর্তনের হারের দ্বিগুণ হওয়া আবশ্যক। 8·14 সর্তটি থেকে আমরা দেখি যে যেকোন মুহূর্তে

$$\overline{B}=2B \quad \cdots \quad 8\cdot15$$

এবং $$2\pi R^2B=\phi \quad \cdots \quad 8\cdot16$$

ত্বরণকালে বিটাত্বরকের ভিতর ϕ এবং B-এর পরিমাণ দ্রুত পরিবর্তিত হতে থাকে কিন্তু প্রতিমুহূর্তেই যদি 8·15 বা 8·16 সম্বন্ধটি পালিত হয় তবে

ইলেকট্রনটি সবসময়ই নির্দিষ্ট R ব্যাসার্দ্ধবিশিষ্ট কক্ষপথের উপর অবস্থান ক'রেই ত্বরিত হবে। দেখা যাচ্ছে যে, কক্ষের অভ্যন্তরের গড় তীব্রতার পরিমাণ পরিধির উপর তীব্রতার দ্বিগুণ হতে হবে, এই কারণেই প্রান্তের দিকে অর্থাৎ যেখানে শূন্যধারটি বসান আছে সেখানে মেরুতলদ্বয়ের মধ্যে দূরত্ব অধিকতর করা হয়। উপরিলিখিত সর্ত্তগুলি পেতে আপেক্ষিকতা-তত্ত্বের সূত্রসমূহ ব্যবহৃত হয়েছে, এজন্য কণাগুলির শক্তি আপেক্ষিকতাস্তরে পৌঁছুলেও, অর্থাৎ গতিবেগের সাথে সাথে ভরের পরিমাণ দ্রুত বৃদ্ধি পেতে থাকলেও নির্দিষ্ট কক্ষপথে ত্বরণের সর্ত্তগুলি সমান কার্য্যকরী থাকে।

বিটাত্বরকের ভিতর যখন ত্বরণ ঘটে তখন ক্রমান্বয়ে চৌম্বকক্ষেত্রের তীব্রতা বৃদ্ধি ক'রে যেতে হয়, চৌম্বকক্ষেত্র সৃষ্টি করার জন্য একটি স্পন্দনশীল বিদ্যুৎ-প্রবাহ ব্যবহার করা হয় এবং এই বিদ্যুৎপ্রবাহের স্পন্দনচক্রের শুধু প্রথম এক-চতুর্থাংশ অর্থাৎ যেখানে চৌম্বকক্ষেত্র ক্রমাগত বৃদ্ধি পেতে থাকে, ত্বরণের জন্য ব্যবহার করা যায়। এই অঞ্চলটি রেখাবৃতরূপে 8·14(b) চিত্রে দেখান হয়েছে। চক্রের পরবর্ত্তী অংশের আবির্ভাব হবার আগেই কণাগুলিকে যন্ত্রের বাইরে সরিয়ে আনার ব্যবস্থা থাকে যাতে ঐ অংশের প্রভাবে প্রতিত্বরিত হয়ে এদের শক্তিক্ষয় না ঘটতে পারে। এরপর পুনরায় পরবর্ত্তী চক্রের প্রথম চতুর্থাংশে ত্বরণ ঘটে, এই কারণে বিটাত্বরকে ত্বরিত কণাগুলি গোছায় গোছায় উৎপন্ন হয়। আধুনিক বিটাত্বরক যন্ত্রে ইলেকট্রনকে সহজেই 300 এমইভি শক্তিতে ত্বরিত করা যায়। কক্ষপথে আবর্ত্তনকালে ত্বরণবিকিরণের ফলে ইলেকট্রনগুলি কিছু পরিমাণ শক্তি ক্ষয় করে (বৃত্তীয় কক্ষপথে আবর্ত্তনের অর্থ হ'ল যে কক্ষের কেন্দ্রের দিকে সবসময় ইলেকট্রনের ত্বরণ বিদ্যমান থাকে এবং ত্বরিত হবার ফলে ইলেকট্রন ত্বরণ-বিকিরণ সৃষ্টি করে)। বিটাত্বরকের তুলনায় ইলেকট্রন অনুসৃত ত্বরকে প্রতি আবর্ত্তন পিছু ইলেকট্রনের শক্তি অর্জ্জনের পরিমাণ সাধারণতঃ অনেক অধিক হয়ে থাকে, এজন্য শেষোক্তক্ষেত্রে ত্বরণবিকিরণের প্রভাব কম লক্ষিত হবে। বিটাত্বরকে প্রাপ্ত চরম শক্তির পরিমাণ ইলেকট্রন অনুসৃত ত্বরকের তুলনায় কম। এই পদ্ধতিতে প্রোটনকেও ত্বরিত করা সম্ভব কিন্তু তাতে অন্যান্য পদ্ধতির তুলনায় বিশেষ কোন সুবিধা নেই ব'লে সাধারণতঃ শুধু ইলেকট্রন এবং কোন কোন ক্ষেত্রে পজিট্রনকে এই পদ্ধতিতে ত্বরিত করা হয়। বর্ত্তমানে উচ্চ স্পন্দনাঙ্কের রঞ্জনরশ্মি উৎপাদনের জন্য বিটাত্বরকের ব্যবহার হয়ে থাকে, এজন্য কখনও কখনও ব্যবসায়মূলকভিত্তিতে এই যন্ত্রের উৎপাদন করা হয়। ইলেকট্রন অনুসৃত ত্বরকে ত্বরিত করার সময় ইলেকট্রনগুলির কিছু পরিমাণে

শক্তিবৃদ্ধি ঘটিয়ে নেবার জন্য প্রাথমিক পর্যায়ে বিটাত্বরকের নীতি প্রয়োগ ক'রে ত্বরণ ঘটান হয়ে থাকে।

প্রশ্নমালা

(1). কিছু ইউরেনিয়াম যাথেকে 4·18 এমইভি শক্তিসম্পন্ন আলফা-কণা নির্গত হয়, একটি আয়নীভবন কক্ষের সামনে রাখা হয়েছে। যদি প্রতি সেকেণ্ডে দশটি কণা ঐ কক্ষের ভিতর প্রবেশ করে তবে তার ফলে কত পরিমান বিদ্যুৎপ্রবাহ সৃষ্টি হবে? একটি আয়নের জোড়া উৎপন্ন করতে 35 ইভি শক্তি প্রয়োজন হয় এবং ইলেকট্রনের আধান $1·6 \times 10^{-19}$ কুলম্ব।

[$1·91 \times 10^{-13}$ এ্যাম্পিয়ার]

(2) একটি আয়নীভবন কক্ষ একটি ইলেকট্রোমিটারের সঙ্গে যুক্ত আছে যার ধারণক্ষমতা 0·5 $\mu\mu$F ($0·5 \times 10^{-12}$ ফ্যারাড) এবং বিভব মাপার স্পর্শকাতরতা হচ্ছে ভোল্ট প্রতি 4 ঘর। একটি আলফাকণা কক্ষের ভিতর প্রবেশ করলে 0·8 ঘর বিচ্যুতি লক্ষিত হয়। কতগুলি আয়নের জোড়া প্রয়োজন হয় এবং আলফাকণাটির শক্তি কত? পূর্ব্ববর্ত্তী প্রশ্নে প্রদত্ত মানসমূহ ব্যবহার কর।

[625×10^{3} সংখ্যক আয়নের জোড়া ; 2·19 এমইভি]

(3) একটি চক্রত্বরকের ভিতরে চৌম্বকক্ষেত্রের তীব্রতা 6,500 গস, এর ভিতর থেকে নির্গত হয়ে আসার ঠিক পূর্ব্বে প্রোটনটির গতিপথের ব্যাসার্দ্ধ 32·0 সেমি। ডি-ঘরের মাঝে প্রযুক্ত স্পন্দনশীল ত্বরকবিভবের চরম পরিমাণ 20,000 ভোল্ট। গতিবেগের সঙ্গে ভরের পরিবর্ত্তন সম্পূর্ণ উপেক্ষা ক'রে নিম্নলিখিত রাশিগুলি গণনা কর: (1) প্রোটনের গতিবেগ, (2) এর শক্তি এবং (3) প্রযুক্ত ত্বরক বিভবের স্পন্দনাঙ্ক।

[$2·0 \times 10^{9}$ সেমি/সেক ; 2·1 এমইভি ; 10^{7} সাইকল/সেক]

(4) একটি গাইগারমুলার টিউবের ভিতর প্রতিমোক্ষণ পিছু 10^{8} সংখ্যক ইলেকট্রন উৎপন্ন হয় এবং ধনবিদ্যুৎ-ধারকের ভিতর সংগৃহীত হয়। যদি গণনার হার হয় 500/মিনিট তবে G-M টিউবের বর্ত্তনীর ভিতর বিদ্যুৎপ্রবাহের পরিমাণ কত?

[$1·33 \times 10^{-10}$ এ্যাম্পিয়ার]

(5) একটি G-M টিউবের ঘনায়তন 50 c.c. এবং এটি শতকরা 90 ভাগ আর্গন এবং 10 ভাগ ইথাইল এ্যালকোহলের দ্বারা পূর্ণ এবং এর

অভ্যন্তরের চাপ 10 সেণ্টিমিটার। যদি প্রতিযোজনে 10^{9} সংখ্যক এ্যালকোহল অণু ভেঙে যায়, তবে ঐ টিউবটি চরমপক্ষে কত সংখ্যক গণনার জন্য ব্যবহৃত হতে পারে? [1.77×10^{10} সংখ্যক গণনা]

(6) একটি চক্রত্বরকের চলনকালীন এর অভ্যন্তরের প্রোটনধারার বিদ্যুৎপ্রবাহের পরিমাণ হয় 20 μamp (মাইক্রোএ্যাম্পিয়ার)। এই প্রোটনের প্রবাহ কত পরিমাণ তেজস্ক্রিয় ক্রিয়াশীলতাকে নির্দেশ করে?

[3·38 কিলোক্যুরী]

(7) একটি চক্রত্বরকের ভিতর চৌম্বকক্ষেত্রের তীব্রতা এবং বিভবের স্পন্দনাঙ্ক ডয়টেরনকে ত্বরিত করার মত অনুরণন অবস্থায় রয়েছে; চৌম্বক-ক্ষেত্রের তীব্রতা পূর্ব্ববৎ বজায় রেখে এই যন্ত্রটি এবার প্রোটনের ত্বরণের জন্য ব্যবহার করতে হবে। বিভবের স্পন্দনাঙ্ক কতটা পরিবর্ত্তন করা প্রয়োজন?

[2·0141/1·0076 অনুপাতে বাড়াতে হবে।]

(8) একটি চক্রত্বরকের ভিতর দুইবার আহিত হিলিয়াম আয়নকে 40 সেণ্টিমিটার চরম ব্যাসার্দ্ধ পর্য্যন্ত ত্বরিত ক'রে নিয়ে যাওয়া যায় এবং এর রেডিও স্পন্দনাঙ্কের পরিমাণ 9·3 মেগাসাইকল/সেকেণ্ড। এর ভিতর চরম শক্তির কণাপ্রবাহ উৎপন্ন করতে কত চৌম্বক তীব্রতা প্রয়োজন হবে?

[$H = 11.3$ কিলোগস]

(9) একটি প্রোটনকে প্রোটন অনুসৃত ত্বরকের ভিতর 3 বিইভি শক্তিতে ত্বরিত করা হয়েছে। এর v/c এবং আপেক্ষিকতান্তরের ভর এবং স্থির ভরের অনুপাত নির্ণয় কর। [$v/c = 0.994$; $M/M_0 = 4.12$]

নবম অধ্যায়

বর্তমান অধ্যায়ে আমরা বিভিন্ন প্রকারের তেজষ্ক্রিয় ক্ষরণ সম্বন্ধে সংক্ষেপে কিছু আলোচনা করব। আমরা দেখেছি যে তিনপ্রকার বিভিন্ন ধরণের তেজষ্ক্রিয় বিকিরণ ঘটা সম্ভব, এগুলি হ'ল আলফা, বিটা এবং গামা ক্ষরণ; প্রত্যেক প্রকার ক্ষরণই নানারকম অভিনব সমস্যার সৃষ্টি করে এবং এগুলি সমাধান করতে গিয়ে পদার্থবিজ্ঞানে অনেক গভীর তাৎপর্য্যপূর্ণ আবিষ্কার সম্ভব হয়েছে। আমরা একে একে বিভিন্ন প্রকার ক্ষরণের ধর্মাবলী সংক্ষেপে আলোচনা করব।

আলফা ক্ষরণ (Alpha decay)

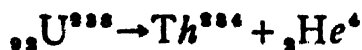
সাধারণতঃ দেখা যায় যে উচ্চ ভরসংখ্যা বিশিষ্ট পরমাণু কেন্দ্রীনের ভিতর থেকেই আলফাকণার ক্ষরণ হয়। অধিকাংশ আলফা বিকিরণই দেখতে পাওয়া যায় সেইসব কেন্দ্রীনগুলির মধ্যে যাদের পারমাণবিক সংখ্যা 82-এর অধিক। আলফাকণার নির্গমনের ফলে কেন্দ্রীনের ভরসংখ্যা 4 এবং পারমাণবিক সংখ্যা 2 কমে যায়, সুতরাং আলফা ক্ষরণের স্বাভাবিক সমীকরণ হ'ল

$$_{Z}X^{A} \rightarrow {}_{Z-2}Y^{A-4} + {}_{2}He^{4}$$

কতগুলি সুপরিচিত উদাহরণ হ'ল

$$_{92}U^{238} \rightarrow Th^{234} + {}_{2}He^{4}$$

$$_{88}Ra^{226} \rightarrow {}_{86}Rn^{222} + {}_{2}He^{4}$$

$$_{84}Po^{218} \rightarrow {}_{82}Pb^{214} + {}_{2}He^{4}$$

আলফা তেজষ্ক্রিয় ক্ষরণ পদার্থবিজ্ঞানের কতগুলি সুপ্রতিষ্ঠিত সংরক্ষণ নীতি মেনে চলে, এদের মধ্যে প্রধান হ'ল শক্তি, ভরবেগ এবং কৌণিক ভরবেগ সংরক্ষণ নীতি এবং আধান সংরক্ষণ নীতি। এই সংরক্ষণ নীতিগুলি প্রয়োগ ক'রে আলফা ক্ষরণ সম্বন্ধে নানারকম ভবিষ্যদ্‌বাণী করা যায়, যেমন শক্তি ও ভরবেগ সংরক্ষণ নীতি প্রয়োগ ক'রে ক্ষরণোত্তর কেন্দ্রীনগুলির শক্তি এবং ভরবেগ নির্ভুলভাবে গণনা করা যায়। আরেকটি সংরক্ষণ নীতি হ'ল কেন্দ্রকণা সংরক্ষণ নীতি, ক্ষরণোত্তর এবং ক্ষরণপূর্ব্ব কেন্দ্রকণাগুলির মোট সংখ্যা পরস্পর সমান থাকে। আলফা ক্ষরণের ক্ষেত্রে শক্তি সংরক্ষণ নীতিটি নিম্নলিখিতভাবে লেখা যায়

$$M_X c^2 = M_Y c^2 + M_\alpha c^2 + T_Y + T_\alpha \quad \cdots \quad 9{\cdot}1$$

যদি ধরা যায় যে ক্ষরণের পূর্বে X কেন্দ্রীনটি স্থির ছিল তবে ভরবেগ সংরক্ষণের সূত্রটি নিম্নলিখিত রূপ নেয়

$$M_Y V_Y = M_\alpha v_\alpha \quad \cdots \quad 9.2$$

এখানে M_Y ইত্যাদি বোঝায় বিভিন্ন কণার ভর, T_Y এবং T_α যথাক্রমে Y কেন্দ্রীন এবং আলফাকণার গতিশক্তি এবং V_Y এবং v_α যথাক্রমে পরীক্ষাগারে মাপা এদের গতিবেগদ্বয়। 9.2 সমীকরণের অর্থ হ'ল যে ক্ষরণের পর Y কেন্দ্রীন এবং আলফাকণা পরস্পরের সমান কিন্তু বিপরীতমুখী ভরবেগ প্রাপ্ত হয়। শক্তি সংরক্ষণ নীতিটি প্রকাশ করতে আমরা আপেক্ষিকতাতত্ত্বের সূত্র $E = mc^2$ ব্যবহার করেছি, তবে যেহেতু আলফা-কণাদের শক্তি অধিকাংশ ক্ষেত্রেই 4 থেকে 9 এমইভির মধ্যে থাকে, এইসব শক্তিতে এদের গতিবেগ হয় আলোর গতিবেগের অনেক কম, $1.4 \times 10^9 \sim 2.2 \times 10^9$ সেমি/সেকেণ্ড। সুতরাং T_Y এবং T_α-এর জন্য নিউটনীয় গতিশক্তির সূত্র ব্যবহার করলে বিশেষ কোন ভুল হবার সম্ভাবনা নেই। ক্ষরণের পূর্বে কেন্দ্রীনটির গতিশক্তি শূন্য, ক্ষরণের পর উৎপন্ন প্রতিটি কণার গতিশক্তি থাকে। এদের মিলিত গতিশক্তির পরিমাণ হ'ল ঐ ক্ষরণের ফলে নির্গত মোট শক্তির পরিমাণ, একে বলা হয় ঐ ক্ষরণের Q পরিমাণ। 9.1 সূত্র থেকে আলফা ক্ষরণের Q-পরিমাণের জন্য আমরা পাই

$$Q = T_Y + T_\alpha = (M_X - M_Y - M_\alpha)c^2 \quad \cdots \quad 9.3$$

Q-পরিমাণ শুধু ক্ষারিত কেন্দ্রীন এবং ক্ষরণজাত বিভিন্ন কণাগুলির স্থির ভরের উপর নির্ভরশীল, একটি বিশেষ ক্ষরণের জন্য এটি সবসময়ই একটি ধ্রুবরাশি এবং Q ঋণরাশি হলে ক্ষরণ ঘটা সম্ভব নয়। 9.3 সম্বন্ধ প্রয়োগ ক'রে বিভিন্ন ভরগুলি পরিমাপ ক'রে কোন একটি আলফা ক্ষরণের Q-পরিমাণ নির্ণয় করা যায়। এ ছাড়া অবশ্য উৎপন্ন বিভিন্ন কণাগুলির গতিশক্তি পৃথকভাবে পরিমাপ ক'রেও Q-পরিমাণ জানা যেতে পারে। একটি সহজ পদ্ধতি হ'ল মেঘকক্ষ কিংবা ফোটোগ্রাফীর অবদ্রবের ভিতর বিভিন্ন কণাগুলির দৌড়দূরত্ব পরিমাপ করা, দৌড়দূরত্ব ও কণাদের গতিশক্তির মধ্যে পারস্পরিক সম্বন্ধ রয়েছে যা থেকে এদের গতিশক্তি পরিমাপ করা যেতে পারে। উভয়দিকের বর্গ নিয়ে 9.2 সমীকরণটি নিম্নলিখিতভাবে লেখা যায়,

$$M_Y \times \tfrac{1}{2} M_Y V_Y^2 = M_\alpha \times \tfrac{1}{2} M_\alpha v_\alpha^2$$

$$M_Y T_Y = M_\alpha T_\alpha$$

এবার 9·3 সম্বন্ধটি প্রয়োগ করলে আমরা পাই,

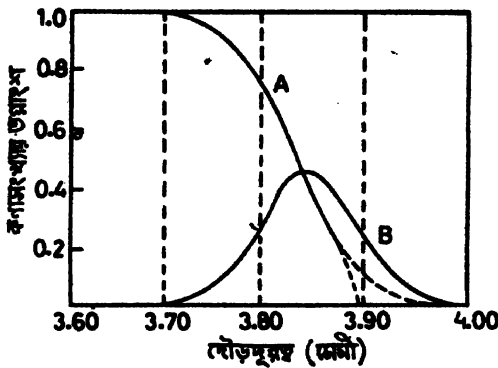
$$Q = T_a + T_Y = T_a\left(1 + \frac{M_a}{M_Y}\right)\ ;\ T_a = \frac{M_Y}{M_a + M_Y}Q \quad \cdots\ 9{\cdot}4$$

সুতরাং T_a পরিমাপ ক'রে 9·4 সম্বন্ধের সাহায্যে Q নির্ণয় করা যায়। যেহেতু Q একটি ধ্রুবক সুতরাং T_a একটি ধ্রুবক। 9·4 সম্বন্ধটি একটি অত্যন্ত প্রয়োজনীয় ফল, এথেকে আমরা দেখি যে শক্তি এবং ভরবেগ সংরক্ষণের ফলাফলহেতু যখনই একটি স্থির কণা দুটি কণায় বিভক্ত হয়ে ক্ষরিত হয় তখন ঐ কণাদ্বয়ের প্রত্যেকটির শক্তি হয় নির্দিষ্ট ধ্রুব পরিমাণের। এই ধরণের ক্ষরণকে বলা হয় দ্বিদেহ ক্ষরণ। উপরোক্ত সিদ্ধান্তগুলি যে কেবল আলফা ক্ষরণের ক্ষেত্রেই সত্য তা নয়, যে কোন দ্বিদেহ ক্ষরণের ক্ষেত্রেই এগুলি প্রযোজ্য। আমরা একটু পরেই বিটা ক্ষরণের ক্ষেত্রে এই ফলাফলগুলির প্রযোজ্যতা সম্বন্ধে আলোচনা করব। U^{238}-এর ক্ষরণে 77% শতাংশ আলফাকণা 4·208 এমইভি শক্তি নিয়ে নির্গত হয়, বাকী 23 শতাংশ 4·13 এমইভি শক্তিতে নির্গত হয়। এই দ্বিতীয় শ্রেণীর কণাগুলির ক্ষেত্রে ক্ষরণোত্তর কেন্দ্রীনটি একটি উত্তেজিত শক্তিস্তরে অবস্থান করে এবং অতি অল্প সময়ের মধ্যেই গামারশ্মি বিকিরণ ক'রে ভূমিস্তরে নেমে আসে। ভরের পরিমাণ থেকে 9·3 সম্বন্ধটি প্রয়োগ ক'রে এই ক্ষরণের যে Q-পরিমাণ নির্ণীত হয়, তা হ'ল 4·28 এমইভি। সুতরাং প্রথম শ্রেণীর আলফাকণাগুলির ক্ষেত্রে (4·208 এমইভি) ক্ষরণোত্তর Th^{234} পরমাণুটি অবশিষ্ট 0·072 এমইভি শক্তি বহন করে। কিন্তু 9·4 সম্বন্ধটি প্রয়োগ ক'রে আমরা Th^{234} ও আলফাকণার দ্বারা বাহিত শক্তির পরিমাণ নির্দ্ধারণ করতে পারি, তা হ'ল যথাক্রমে মোট শক্তির $\frac{234}{238}$ ও $\frac{4}{238}$ অংশ যা উপরিলিখিত পরিমাণদ্বয়ের সঙ্গে অভিন্ন। এথেকে আলফা ক্ষরণের ক্ষেত্রে শক্তি ও ভরবেগ সংরক্ষণ নীতির যথার্থতা প্রতিপন্ন হয়।

আলফাকণার দৌড়দূরত্ব (Range)

পদার্থের ভিতর আলফাকণাগুলি সহজেই শোষিত হয় এবং এদের শোষণের প্রকৃতি লক্ষ্য ক'রে এদের গতিশক্তি নির্দ্ধারণ করা সম্ভব। বিভিন্ন তেজস্ক্রিয় ক্ষরণের ফলে যে আলফাকণাগুলি উৎপন্ন হয় সেগুলির অধিকাংশই 0·004 সেমি পুরু একটি অ্যালুমিনিয়ামের পাত অথবা কয়েক সেন্টিমিটার বাতাসের মধ্যেই শোষিত হয়ে যায়। α কণাগুলি যদি জিঙ্ক সালফাইডের পর্দার উপর এদের দ্বারা সৃষ্ট চমক লক্ষ্য ক'রে গণনা করা হয় তবে দেখা যাবে যে, উৎস থেকে কোন নির্দিষ্ট চরম দূরত্ব R পর্যন্ত এদের সংখ্যা প্রায় ধ্রুব থাকে

কিন্তু তারপরেই, অতি অল্প দূরত্বের মধ্যেই এই সংখ্যা অত্যন্ত দ্রুত হ্রাস পায়। এই R দূরত্বকে বলা হয় আলফাকণার দৌড়দূরত্ব (range)। দৌড়দূরত্ব জানা থাকলে আলফাকণার শক্তি নির্দ্ধারিত হয়, কারণ কোন নির্দিষ্ট শক্তির আলফাকণার কোন মাধ্যমের ভিতর কতখানি দৌড়দূরত্ব হবে তা তাত্ত্বিক উপায়ে গণনা করা যায়।

খুব সহজ পরীক্ষার আয়োজনের সাহায্যেই বাতাসের ভিতর আলফাকণার দৌড়দূরত্ব (range) নির্ভুলভাবে নির্ণয় করা যায়। আলফাকণার উৎসটি বসান হয় একটি চলনক্ষম দণ্ডের উপর এবং গণনকার ও উৎসের মধ্যে দূরত্ব ইচ্ছামত কমান বা বাড়ান যায়। কতগুলি ফাঁকের সাহায্যে একটি খুব সরু সরলরৈখিক আলফাকণার ধারা প্রস্তুত করা হয় এবং কণাগুলি বাতাসের ভিতর নির্দিষ্ট দূরত্ব অতিক্রম ক'রে অবশেষে গণনকারের ভিতর এসে পড়ে। গণনকারটি হ'ল একটি পাতলা ডায়াফ্রাম দিয়ে ঘেরা আয়নীভবন কক্ষ যার অভ্যন্তর 1 থেকে 2 মিলিমিটার প্রশস্ত। যখনই আলফাকণা কক্ষের ভিতর দিয়ে যায়

চিত্র 9·1
পলোনিয়াম আলফাকণাদের গড় দৌড়দূরত্ব বনাম কণাসংখ্যার ভগ্নাংশের লেখ।
[Holloway, M. G. and Livingston, M. S.;
Phys. Rev. 54, 18, 1938.]

তখনই একটি আয়নোচ্ছ্বাস সৃষ্টি হয়। কক্ষের বিদ্যুৎধারকের ভিতর যে বিভব-ব্যত্যয় সৃষ্টি হয় সেটি ইলেকট্রনিক বর্তনীর দ্বারা বর্দ্ধিত ক'রে গণনা করা হয়। গণনার হার অবশেষে উৎস এবং গণনকারের মধ্যে দূরত্বের অপেক্ষক হিসাবে নির্ণয় করা হয়। 9·1 চিত্রে পলোনিয়াম আলফাকণার জন্য দূরত্ব বনাম গণনার হারের এরকম একটি লেখ দেখান হয়েছে। A লেখটি থেকে দেখা যাচ্ছে যে প্রায় সমস্ত কণাগুলিই গণ্য হচ্ছে যতক্ষণ পর্যন্ত উৎস ও গণনকারটির মধ্যে দূরত্ব 3·75 সেমির কম থাকে, কিন্তু তারপর গণ্য ভগ্নাংশের পরিমাণ অতি

দ্রুত হ্রাস পেতে থাকে, এর পরিমাণ হয় 0·2 যখন দূরত্ব 3·88 সেমি, এর পরে আবার হ্রাসপ্রাপ্তির হার শ্লথ হয় এবং ধীরে ধীরে 4·00 সেমি দূরত্বের মধ্যেই গণনার পরিমাণ শূন্য হয়ে পড়ে। 3·88 সেমি দূরত্বে যেখানে এসে লেখটি সহসা বেঁকে যায় সেই বিন্দুতে যদি একটি স্পর্শক টানা যায় তবে তা 3·897 সেমি দূরত্বে গিয়ে x-অক্ষকে ছেদ করে। এই ছেদবিন্দুর দূরত্বকে বলা হয় দূরবিন্যস্ত (extrapolated) দৌড়দূরত্ব।

যদি সংখ্যা বনাম দূরত্বসূচক লেখটির বিভিন্ন দূরত্বে অবকল সহগ (differential coefficient) গণনা করা যায় এবং পরিশেষে তা দূরত্বের অপেক্ষক হিসাবে লেখচিত্রের ভিতর অঙ্কন করা হয়, তাহলে যে লেখটি পাওয়া যাবে তাকে বলা হয় অবকল দৌড়দূরত্বের (differential range) লেখ (লেখ B)। এই লেখটি আসলে হ'ল কণাগুলির আপেক্ষিক সংখ্যা যা কোন একটি নির্দিষ্ট দূরত্বে এসে থেমে গিয়েছে বনাম সেই দূরত্বের লেখ। y-অক্ষের এককটি এমনভাবে পছন্দ করা হয়েছে যে অবকল দৌড়-দূরত্বের লেখটির অভ্যন্তরে যে আয়তন রয়েছে তার পরিমাণ 1, অর্থাৎ সমস্ত কণাগুলিই গণ্য হয়েছে। অবকল দৌড়দূরত্বের লেখটি যে x-অক্ষাংশে এসে y-অক্ষের চরম পরিমাণ প্রাপ্ত হয় তাকে বলা হয় গড় দৌড়দূরত্ব। এই গড় দৌড়দূরত্বের সংজ্ঞা এমনভাবে দেওয়া হয়েছে যাতে অর্দ্ধেক পরিমাণ কণার গতিপথের দৈর্ঘ্য এর চেয়ে বেশী এবং অপর অর্দ্ধেকের এর চেয়ে কম হয়, পলোনিয়াম আলফাদের ক্ষেত্রে এই পরিমাণ হ'ল 3·84 সেমি। A এবং B উভয় লেখ থেকেই সুস্পষ্ট প্রতীয়মান হয় যে সবগুলি আলফাকণার দৌড়দূরত্ব সমান নয়, এদের মান একটি গড় পরিমাণের উভয়দিকে বিতরিত থাকে। এই ঘটনাটিকে বলা হয় কণাদের দলচ্যুতি (straggling)। মেঘকক্ষের ভিতর তোলা আলফাকণাদের গতিপথের ছবিতে এই দলচ্যুতি খুব সহজেই লক্ষ্য করা যায় (চিত্র 9·4)। এইসব ছবিতে দেখা যায় যে বিভিন্ন কণার গতিপথের দৈর্ঘ্য সমান নয়, অবশ্য পার্থক্যের পরিমাণ খুব বেশী হয় না। তাছাড়া শেষদিকে এসে গতিপথটি ইতস্ততঃ বেঁকে যেতেও লক্ষ্য করা যায়।

দলচ্যুতির কারণ অবশ্য সহজেই অনুমেয়। আলফাকণার শক্তি ক্ষয় হয় মূলতঃ আয়নীভবনের দ্বারা এবং এই আয়নীভবন নির্ভর করে কণাটি এর গতিপথে কতগুলি কণার সঙ্গে সংঘর্ষ ঘটায় এবং কিভাবে এই সংঘর্ষ ঘটে তার উপর। প্রতি সেন্টিমিটার বাতাসের ভিতর অগ্রসর হতে কোন কোন কণা অধিক-সংখ্যক সংঘর্ষ ঘটায় এবং কোন কোনটি অপেক্ষাকৃত কমসংখ্যক সংঘর্ষের সন্মুখীন হয়, যদিও উভয় ক্ষেত্রেই মোট সংঘর্ষের পরিমাণ একটি গড় পরিমাণের

নিকটবর্তী থাকে। এই কারণেই প্রাথমিক শক্তি অভিন্ন হওয়া সত্ত্বেও বিভিন্ন আলফাকণা বাতাসের ভিতর বিভিন্ন দূরত্ব অতিক্রম করে এবং এভাবে দলচ্যুতির উদ্ভব হয়। দলচ্যুতি ঘটার ফলে প্রতিটি আলফাকণার নির্দিষ্ট থাকে না এবং এটা বোঝাতে পূর্বোক্ত দূরবিন্যস্ত দৌড়দূরত্ব অথবা গড় দৌড়দূরত্ব ব্যবহৃত হয়, সাধারণতঃ 15° সেণ্টিগ্রেড তাপমাত্রা এবং 760 মিলিমিটার পারদের চাপে বাতাসের ভিতর এইসব দূরত্বগুলি পরিমাপ করা হয়।

দৌড়দূরত্ব বনাম শক্তির লেখ

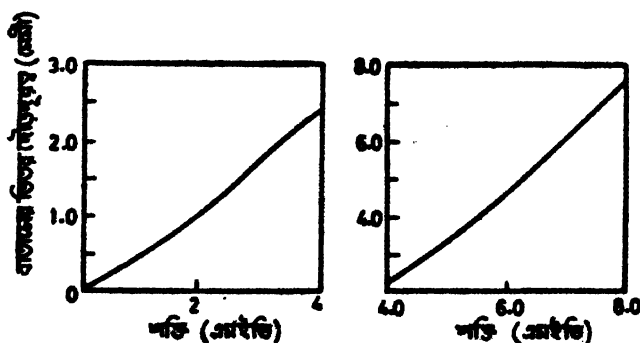
প্রকৃতিলব্ধ কতগুলি তেজষ্ক্রিয় পদার্থের ভিতর থেকে জাত আলফাকণাদের দৌড়দূরত্ব 9·1 সারণীতে লিপিবদ্ধ করা হয়েছে। সেই সঙ্গে চৌম্বকক্ষেত্রের ভিতর বিচ্যুতির দ্বারা নির্দ্ধারিত এদের শক্তির পরিমাণও নির্দেশ করা হয়েছে, এইপ্রকার পরিমাপের পদ্ধতি সম্বন্ধে পরবর্তী পরিচ্ছেদে আলোচনা করা হবে। এই সারণীতে প্রদত্ত রাশিগুলি থেকে গড় দৌড়দূরত্ব ও শক্তির মধ্যে পারস্পরিক সম্বন্ধ অনুধাবন করা যায়। দৌড়দূরত্ব শক্তির সাথে সাথে বৃদ্ধি পেতে থাকে। প্রাপ্ত ফলাফলের বিশ্লেষণে লক্ষ্য করা যায় যে, যেসব কণাগুলির ক্ষেত্রে বাতাসের ভিতর গড় দৌড়দূরত্ব 3 থেকে 7 সেণ্টিমিটারের ভিতর থাকে সেগুলির ক্ষেত্রে নিম্নলিখিত অপেক্ষকের দ্বারা গড় দৌড়দূরত্ব ও শক্তির পারস্পরিক সম্বন্ধ প্রকাশ করা চলে

$$R = 0{\cdot}319\ E^{\frac{3}{2}} \qquad \cdots \qquad 9{\cdot}5$$

এখানে $\bar{R}$ গড় দৌড়দূরত্ব, এবং শক্তি E এমইভিতে প্রকাশিত। এই সূত্রটি মোটামুটি নির্ভুলভাবে পালিত হয়। তবে সাধারণতঃ পরীক্ষালব্ধ পরিমাণ থেকে শক্তি ও গড় দৌড়দূরত্বের মধ্যে একটি লেখ আঁকা হয় এবং এটির সাহায্যে পরে অজ্ঞাত আলফাকণাদের দৌড়দূরত্ব পরীক্ষায় মেপে তাথেকে এদের শক্তি নির্ণয় করা যায়, 9·2 চিত্রে এই লেখ দেখান হয়েছে। দূর-আরোপিত দৌড়দূরত্ব যা পূর্বোল্লিখিত সংখ্যা বনাম দূরত্বের লেখটি থেকে পাওয়া যায় (9·1 লেখ) তা সবসময়ই হয় গড় দৌড়দূরত্বের তুলনায় অধিক। এই দূর-আরোপিত দৌড়দূরত্ব অপেক্ষাকৃত সহজেই পরীক্ষার দ্বারা নির্ণয় করা যায় এবং তারপর তাথেকে গড় দৌড়দূরত্ব নিরূপিত হয়। তবে গড় দূরত্বের সুবিধা হ'ল এই যে, এটি পরীক্ষার আয়োজনের প্রকৃতির উপর নির্ভরশীল নয় এবং দৌড়-দূরত্ব বনাম শক্তির লেখ-এর ভিতর কিংবা তাত্ত্বিক গণনার জন্য এইটিই সচরাচর ব্যবহৃত হয়।

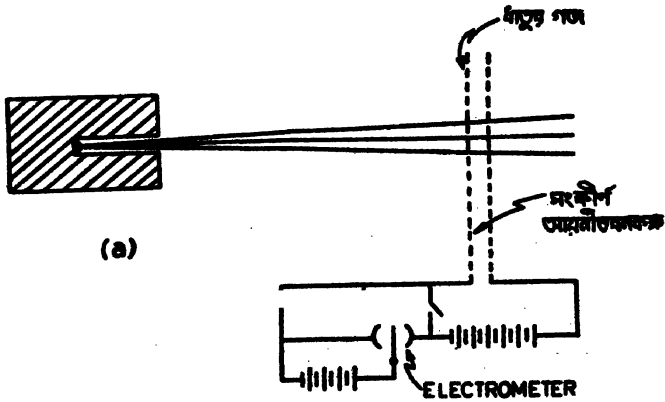
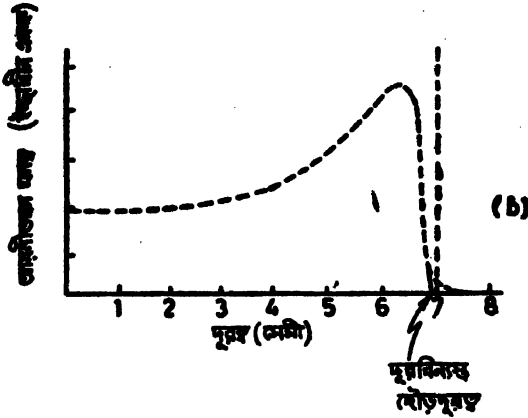
9·1 সারণী

আইসোটোপ	গড় দৌড়দূরত্ব (বায়ু) (সেমি)	দূর আরোপিত দৌড়দূরত্ব (সেমি)	শক্তি (এমইভি)
$_{84}Po^{215}$ (AcA)	6·45	6·54	7·38
$_{83}Bi^{211}$ (AcC)	4·98	5·05	6·27
$_{84}Po^{211}$ (AcC′)	6·55	6·64	7·44
$_{83}Bi^{212}$ (ThC)	4·73	4·79	6·05
$_{84}Po^{212}$ (ThC′)	8·57	8·67	8·78
	9·72	9·84	9·48
	11·58	11·71	10·53
$_{84}Po^{218}$ (RaA)	4·65	4·72	5·99
$_{84}Po^{214}$ (RaC′)	6·90	6·99	7·68
	7·79	7·89	8·27
	9·04	9·15	9·06
	11·50	11·64	10·50
$_{84}Po^{210}$ (RaF)	3·84	3·89	5·29

চিত্র 9·2

15°C তাপমাত্রা ও 76 সেমি পারদের চাপে বাতাসের ভিতর আলফাকণাদের গড় দৌড়দূরত্ব ও এদের শক্তির ভিতর পারস্পরিক সম্বন্ধ [H. A. Bethe, Rev. Mod. Phys. 22, 213 (1950).]

আলফাকণার আয়নীভবন

আলফাকণার আয়নীভবন ক্ষমতা খুব বেশী, এর গতিপথে যে পরমাণুগুলি থাকে তাদের বহিঃস্থ ইলেকট্রনগুলির সঙ্গে সংঘর্ষের ফলে আয়নীভবন ঘটে, আয়নীভবন ছাড়া পরমাণুর উত্তেজনও ঘটতে পারে। সাধারণতঃ এইসব

প্রক্রিয়ায় আলফাকণার গতিপথের বিচ্যুতি খুবই কম হয় এজন্য মেঘকক্ষের ছবিতে কিংবা ফোটোগ্রাফীর অবদ্রবের ভিতর এর গতিপথটি একটি সরল রেখার মত দেখায়। তবে কদাচ কোন কেন্দ্রীনের খুব নিকটে আসলে কণাটি হঠাৎ এর গতিপথ থেকে খুব বেশী বেঁকে যেতে পারে, মেঘকক্ষের ছবিতে সেরকম ঘটনাও দেখতে পাওয়া যায়। আলফাকণা কোন গ্যাসের ভিতর দিয়ে যাবার

চিত্র 9·3

(a) আলফাকণাদের আয়নীভবন ঘনত্ব নির্ধারণের জন্য একটি পরীক্ষার আয়োজন।
(b) $P_o^{214}\alpha$ কণার আয়নীভবন লেখ।

সময় এর $Z=2$ আধান মোটামুটি দৌড়দূরত্বের শতকরা 90 ভাগ দূরত্ব পর্যন্ত বজায় রাখে। কিন্তু গতিপথের একেবারে শেষ প্রান্তে এসে এর আধানের পরিবর্তন হয়। এটি ঘন ঘন ইলেকট্রন আহরণ ও নির্মোচন করতে থাকে যার

কলে এর ক্রিয়াশীল আধানের পরিমাণ ক্রমশঃ হ্রাস পেতে থাকে। যদি কোন আলফাকণার প্রাথমিক শক্তিকে এটি মোট যত আয়নের জোড়া উৎপন্ন করে সেই সংখ্যা দিয়ে ভাগ করা যায় তাহলে গড়ে একটি আয়নের জোড়া উৎপন্ন করতে যত শক্তির প্রয়োজন হয় তা পাওয়া যায়। বিভিন্ন শক্তির আলফাকণার ক্ষেত্রে পরীক্ষা ক'রে দেখা যায় যে ঐ গড় শক্তির পরিমাণ মোটামুটি অভিন্ন থাকে, অর্থাৎ গড় আয়নীভবন শক্তি ঐ গ্যাসের একটি বৈশিষ্ট্য এবং তা আলফাকণার গতিবেগ নিরপেক্ষ। বিভিন্ন গ্যাসের ক্ষেত্রে এই পরিমাণগুলি হ'ল মোটামুটি নিম্নরূপঃ হাইড্রোজেন 36·3 ইভি, হিলিয়াম 42·7 ইভি, নাইট্রোজেন 36·6 ইভি, আর্গন 26·4 ইভি, ইত্যাদি। এই পরিমাণগুলি অবশ্য ঐসব গ্যাসের আয়নীভবন বিভবের তুলনায় যথেষ্ট বেশী, তার কারণ আলফাকণাগুলির শক্তিক্ষয় শুধু একমাত্র আয়নীভবনের দ্বারাই ঘটে না, উৎখাত ইলেকট্রনের ভিতর গতিশক্তি সঞ্চার করতে এবং পরমাণুগুলিকে উত্তেজিত করতেও যথেষ্ট পরিমাণে শক্তি ক্ষয়িত হয়। আলফাকণার গতিপথে আয়নীভবন ঘনত্বের (specific ionisation) সংজ্ঞা হ'ল প্রতি একক (এক মিলিমিটার) দৈর্ঘ্যের মধ্যে উৎপন্ন আয়নের সংখ্যা, এর পরিমাণ সর্বাধিক হয় দৌড়দূরত্বের শেষ সীমায় এসে, কারণ তখন কণাগুলির গতিবেগ খুব হ্রাস পায়, এগুলি দীর্ঘসময় যাবৎ পরমাণুর নিকটে অবস্থান করতে পারে এবং তাতে আয়নীভবন ঘটার সম্ভাবনা বৃদ্ধি পায়।

চিত্র 9·4

মেঘকক্ষের ভিতর আলফাকণার গতিপথের চিত্র। একটি একক দীর্ঘতর রেখা এই কণাগুলির মধ্যে কিছু সাধারণ-সংখ্যক দীর্ঘতর দৌড়দূরত্ব সমন্বিত আলফাকণার অস্তিত্ব নির্দেশ করছে।

মেঘকক্ষ কিংবা ফোটোগ্রাফীর অবদ্রবের ভিতর আলফাকণার গতিপথের চিত্র পরীক্ষা ক'রে তাথেকে গতিপথের উপর প্রত্যেক অঞ্চলে আয়নীভবন ঘনত্ব নির্ণয় করা যায়। তখন আয়নীভবন ঘনত্ব মেঘকক্ষের ভিতর জলবিন্দুর ঘনত্ব কিংবা অবদ্রবের মধ্যে দানার ঘনত্বের সমান হয় (দ্বাদশ অধ্যায়ে এই ধরনের পরীক্ষা সম্বন্ধে আরও আলোচনা করা হবে)। বিজ্ঞানী ব্র্যাগ (W. H. Bragg) একটি সহজ পরীক্ষার দ্বারা আলফাকণার আয়নীভবন ঘনত্ব এদের ভ্রমণপথের দূরত্বের অপেক্ষক হিসাবে নির্ণয় করেন, 9·3(a) চিত্রে ঐ পরীক্ষার আয়োজন দেখান হয়েছে। দুটি ধাতুর তৈরী গজ পরস্পর সমান্তরাল এবং খুব স্বল্পদূরে অবস্থিত, এরা মিলে একটি আয়নীভবন কক্ষের আয়োজন সৃষ্টি

করেছে। একটি খুব সরু আলফাকণার ধারা একটি সীসার ফাঁকের আয়োজনের ভিতর থেকে বেরিয়ে এসে এই আয়নীভবন কক্ষের ভিতর আপতিত হয়। এই দুটি গজের মধ্যে যে পরিপুষ্ট বৈদ্যুতিক প্রবাহ সৃষ্টি হয় তা হ'ল এদের মধ্যে আলফাকণাদের দ্বারা সৃষ্ট আয়নীভবন ঘনত্বের সমানুপাতী। উৎসটি এগিয়ে পিছিয়ে দিয়ে আলফাকণার গতিপথের উপর বিভিন্ন বিন্দুতে আয়নীভবন ঘনত্ব নির্ণয় করা যায়। সমস্ত আয়োজনটি একটি বদ্ধ আধারের ভিতর রেখেও পরীক্ষা করা যায় এবং তখন বিভিন্ন গ্যাসের ভিতর এবং বিভিন্ন চাপে আয়নীভবন ঘনত্ব নির্ণীত হতে পারে। ব্র্যাগ এই পরীক্ষা থেকে আয়নীভবন ঘনত্বের যে লেখটি পান তা 9·3(b) চিত্রে দেখান হয়েছে।

আয়নীভবন ঘনত্ব বনাম দূরত্বের লেখটির সাহায্যেও আলফাকণার-দৌড়-দূরত্ব নির্ণয় করা যায়, দৌড়দূরত্ব হ'ল সেই বিন্দু যেখানে এসে আলফাকণা এর আয়নীভবন ক্ষমতা সম্পূর্ণ হারিয়ে ফেলে। শেষদিকে এসে অবশ্য লেখটিতে একটি বাঁকান লেজের মত অবস্থার সৃষ্টি হয় যেমন চিত্রে দেখা যাচ্ছে। এর কারণ, যেহেতু আলফাকণার সংঘর্ষ সম্ভাব্যতার নীতি অনুযায়ী ঘটে এজন্য প্রতিটি কণার দ্বারা আয়নীভবনের পরিমাণ সমান হয় না। এক্ষেত্রে যে বিন্দুতে এসে লেখটি বাঁকতে শুরু করেছে সেই বিন্দুতে একটি স্পর্শক টানলে তা x-অক্ষকে যে বিন্দুতে ছেদ করে তা-ই হ'ল আলফাকণার দূরবিন্যস্ত দৌড়দূরত্ব (extrapolated range)। আয়নীভবন ঘনত্বের এই লেখটির আকৃতি বিভিন্নপ্রকার কণার ক্ষেত্রে প্রায় অভিন্নই থাকে। এই লেখটিকে সমাকলন করলে আমরা পাই মোট আয়নীভবনের পরিমাণ, অর্থাৎ মোট উৎপন্ন আয়নের জোড়ার সংখ্যা এবং আলফাকণার সংখ্যা জানা থাকলে এর দ্বারা একটি আলফাকণা মোট কতগুলি আয়নের জোড়া উৎপন্ন করে তা নির্ণয় করা যায়। 75 সেমি পারদের চাপ ও $15°$ তাপমাত্রায় বাতাসের ভিতর 6·90 সেমি দৌড়দূরত্ব সম্পন্ন Po^{214}-এর আলফাকণা গড়ে মোট $2·2 \times 10^5$ সংখ্যক আয়নের জোড়া উৎপন্ন করে।

প্রাথমিক আয়নীভবনের দ্বারা উৎপন্ন শক্তিশালী ইলেকট্রনগুলিও পুনরায় আয়নীভবন সৃষ্টি করতে পারে। মেঘকক্ষের ভিতর আলফাকণার গতিবেগের মধ্য থেকে অনেকসময়ই ঐ ধরণের শক্তিশালী ইলেকট্রনের পথরেখা উৎপন্ন হতে দেখা যায়, এগুলিকে বলা হয় "ডেল্টা রশ্মি" (delta rays)।

আলফাকণার শক্তি ও গতিবেগ

আমরা এখন চৌম্বক বিশ্লেষকের সাহায্যে আলফাকণার শক্তি নির্ণয়ের পদ্ধতি আলোচনা করব। এই পদ্ধতিতে আলফাকণার শক্তি অত্যন্ত

নির্ভুলভাবে নির্ধারিত হয়, এদের মধ্যে শক্তির বিভাজনও এ পদ্ধতিতে অনুশীলন করা চলে। আলফাকণাগুলির মধ্যে যে শক্তির বিভাজন রয়েছে তা শোষণের পরীক্ষাতেই প্রথম ধরা পড়ে, দেখা যায় যে, একই তেজস্ক্রিয় কেন্দ্রীন থেকে বিভিন্ন শ্রেণীর আলফাকণা উৎপন্ন হয় যাদের শক্তি বিভিন্ন। নির্দিষ্ট ধ্রুব চৌম্বকক্ষেত্রের ভিতর আলফাকণার গতিপথের বক্রতার ব্যাসার্ধ লক্ষ্য ক'রে এর শক্তি ও গতিবেগ নির্ণয় করা যায়। আহিত কণাগুলি ধ্রুব চৌম্বকক্ষেত্রের ভিতর বেঁকে গিয়ে একটি বৃত্তাকার পথে চলে এবং ঐ পথের ব্যাসার্ধ যদি r হয় তবে

$$\frac{Bqv}{c}=\frac{Mv^2}{r}$$

এখানে B ধ্রুব চৌম্বকক্ষেত্রের তীব্রতা, q স্থিরবৈদ্যুতিক এককে আলফাকণার আধান, M এর ভর। সুতরাং এথেকে

$$v=\frac{q}{Mc}\,Br \qquad \cdots \quad 9\cdot6$$

আলফাকণার আধান ও ভর নির্ভুলভাবে জ্ঞাত ধরে নিলে এই সমীকরণের দ্বারা B এবং r পরিমাপ ক'রে প্রত্যেক ক্ষেত্রে গতিবেগ v নির্ণয় করা যায়। স্বাভাবিক তেজস্ক্রিয় পদার্থ থেকে যে আলফাকণা নির্গত হয় তাদের শক্তি সাধারণতঃ এতই কম থাকে যে, এদের জন্য আপেক্ষিকতাতাত্ত্বিক সূত্র প্রয়োগের কোন প্রয়োজন হয় না। তবে খুব বেশী নির্ভুল পরিমাপের জন্য কখনও কখনও আপেক্ষিকতাতাত্ত্বিক সূত্রের প্রয়োগ প্রয়োজনীয় হয়ে পড়তে পারে, সেক্ষেত্রে নিম্নলিখিত সূত্র প্রযোজ্য হয়

$$v=Br\left(\frac{q}{cM_0}\right)\,(1-v^2/c^2)^{\frac{1}{2}}$$

$$\text{গতিশক্তি}=M_0c^2\{(1-v^2/c^2)^{-\frac{1}{2}}-1\} \qquad \cdots \quad 9\cdot7$$

পরীক্ষার আয়োজন 6·11 চিত্রের ইলেকট্রনের শক্তি নির্ধারণের পরীক্ষার আয়োজনের চিত্রের অনুরূপ। একটি তেজস্ক্রিয় উৎস থেকে আলফাকণাগুলি কতগুলি ফাঁকের মধ্য দিয়ে অগ্রসর হয়ে একটি অত্যন্ত সরু ধারায় পরিণত হয়। একটি চৌম্বকক্ষেত্র যা কণাগুলির সঙ্গে লম্বভাবে থাকে, এগুলিকে 180° কোণে বাঁকিয়ে ফেলে। আয়োজনটি একটি কক্ষের ভিতর থাকে এবং এই কক্ষের মধ্যে একাধিক ফাঁক আটকান থাকে যেগুলি এর দেওয়াল থেকে পুনর্বার আলফাকণাদের বিকিরণ বন্ধ করতে সাহায্য করে। যেসব

কণার গতিবেগ অভিন্ন সেগুলি একটি নির্দিষ্ট বৃত্তে ভ্রমণ করে এবং ভ্রমণপথের শেষে ফোটোগ্রাফীর প্লেট বা আলফা গণনকারের সাহায্যে এগুলি লক্ষ্য করা হয়। আলফাকণাগুলি যেহেতু একটি পূর্ণ অর্দ্ধবৃত্তে ভ্রমণ করে, গণনকার ও উৎসমুখের অবস্থান দেখে সহজেই এদের গতিপথের ব্যাসার্দ্ধ নির্ণয় করা যায়। এই ধরণের আয়োজনের ভিতর 40 বা 50 সেমি চরম ব্যাসার্দ্ধ বিশিষ্ট বৃত্তাকার পথ সৃষ্টি করা যায়। এই আয়োজনকে বলা হয় চৌম্বক বর্ণালী বিশ্লেষক এবং একই গতিবেগ বিশিষ্ট বিভিন্ন কণাগুলি যাদের গতিপথের দিকের মধ্যে স্বল্প কৌণিক পার্থক্য থাকে, সেগুলি এই যন্ত্রে একই বিন্দুতে এসে ফোকাস হবে। এর ফলে ফোকাস বিন্দুতে আলফাকণার তীব্রতা অত্যন্ত বর্দ্ধিত হয় এবং এই হিসাবে এই যন্ত্রের ব্যবহার ঠিক পূর্বোল্লিখিত ইলেকট্রন শক্তি বর্ণালী বিশ্লেষকের অনুরূপ।

9·6 সূত্র থেকে দেখা যায় যে আলফাকণাগুলির গতিবেগ 'Br' গুণফলের সমানুপাতী, অনুপাতের ধ্রুবকটি সহজেই গণনা করা যায়। আলফা-কণার $q=2e$ এবং ভর $M=4{\cdot}0027$ এএমইউ $=4{\cdot}0027\times 1{\cdot}66\times10^{-24}$ গ্রাম $=6{\cdot}644\times10^{-24}$ গ্রাম, সুতরাং

$$\frac{q}{Mc}=\frac{2\times4{\cdot}8029\times10^{-10}\ \text{স্থির বৈদ্যুতিক একক}}{(6{\cdot}644\times10^{-24}\ \text{গ্রাম})\times(2{\cdot}998\times10^{10}\ \text{সেমি/সেক})}$$

বিদ্যুৎচুম্বকীয় একক/গ্রাম

$=4822$ বিদ্যুৎচুম্বকীয় একক/গ্রাম

এবং v (সেমি/সেক) $=4822\ Br$।

উদাহরণ : একটি পরীক্ষায় Po^{212} তেজস্ক্রিয় কেন্দ্রীন থেকে নির্গত আলফাকণাগুলি 10,000 গস তীব্রতাসম্পন্ন চৌম্বকবর্ণালী বিশ্লেষকের ভিতর পরীক্ষা ক'রে দেখা গেল যে এদের গতিপথের ব্যাসার্দ্ধ 42·6 সেণ্টিমিটার ; কণাগুলির শক্তি এবং গতিবেগ কত হবে ?

সমাধান : গতিবেগ 9·6 সূত্রটি প্রয়োগ ক'রে সহজেই নির্ণয় করা যায়

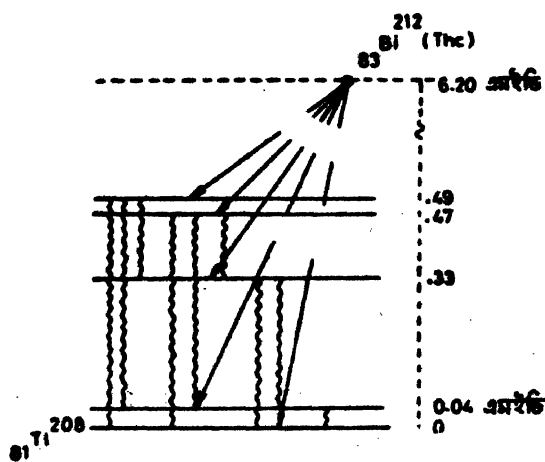
$$v=4822\times(10{,}000\times42{\cdot}6)\ \text{সেমি/সেক}$$
$$=2{\cdot}05\times10^{9}\ \text{সেমি/সেক}$$

$$\text{গতিশক্তি} = \tfrac{1}{2} Mv^2 = \tfrac{1}{2}(6{\cdot}644)\times 10^{-24} v^2 \text{ আর্গ}$$

$$= \tfrac{1}{2}\frac{6{\cdot}644\times 10^{-24}}{1{\cdot}6\times 10^{-6}} v^2 \text{ এমইভি}$$

$$= 8{\cdot}78 \text{ এমইভি।}$$

আলফা ক্ষরণ ও পরমাণুর শক্তিস্তর

প্রথম পরিচ্ছেদের আলোচনা থেকে মনে হবে যে, শক্তি ও ভরবেগ সংরক্ষণের নীতি অনুসারে কোন একটি বিশেষ ধরণের তেজস্ক্রিয় কেন্দ্রীন থেকে নির্গত আলফাকণার শক্তি সবসময়ই ধ্রুব পরিমাণের হবে। কিন্তু অনেক সময়ই দেখা যায় যে, একই কেন্দ্রীন থেকে আলফাকণাগুলি বিভিন্ন শক্তি নিয়ে নির্গত হচ্ছে, এর উদাহরণ U^{238}-এর ক্ষেত্রে পূর্বে দেওয়া হয়েছে, তাছাড়া 9·1 সারণীতেও কতগুলি তেজস্ক্রিয় আইসোটোপের ভিতর থেকে উৎপন্ন আলফাকণাদের যে একাধিক দৌড়দূরত্ব এবং সেইহেতু একাধিক বিভিন্ন শক্তি থাকতে পারে তা দেখান হয়েছে। আলফাকণাগুলির মধ্যে যে বিভিন্ন শক্তি

চিত্র 9·5

Bi^{212} আইসোটোপের আলফা ক্ষরণে দুই Tl^{208} কেন্দ্রীনের কয়েকটি শক্তিস্তর।

দৃষ্ট হয় তার মূল কারণ হ'ল ক্ষরণোত্তর কেন্দ্রীনটির ভিতর একাধিক শক্তিস্তরের উপস্থিতি। ক্ষরণোত্তর কেন্দ্রীনটি সাধারণতঃ এর কোন একটি উত্তেজিত শক্তিস্তরে অবস্থান করে এবং পরে এক বা একাধিক গামারশ্মি বিকিরণ ক'রে এর ভূমিস্তরে নেমে আসে। 9·3 চিত্রে $_{81}Tl^{208}$ আইসোটোপটির শক্তিস্তরগুলি দেখান হয়েছে, $_{83}Bi^{212}$ কেন্দ্রীনের মধ্য থেকে

আলফা ক্ষরণের ফলে এই কেন্দ্রীনটির উৎপত্তি হয় এবং যেসকল উত্তেজিত শক্তিস্তর দেখান হয়েছে ক্ষরণোত্তর কেন্দ্রীনটি তার যেকোন একটিতে অবস্থান করতে পারে, আলফা ক্ষরণের খুব অল্প সময়ের মধ্যেই এক বা একাধিক গামা ক্ষরণের দ্বারা কেন্দ্রীনটি ভূমিস্তরে নেমে আসে। চিত্রে তীরচিহ্নিত রেখার সাহায্যে আলফাকণার ক্ষরণ এবং তরঙ্গিত রেখার দ্বারা গামারশ্মি বিকিরণ বোঝান হয়েছে। Bi^{212} কেন্দ্রীনের আলফা ক্ষরণের ফলে Tl^{208} কেন্দ্রীনটি যতগুলি উত্তেজিত শক্তিস্তরে উপনীত থাকতে পারে, ঠিক ততগুলি বিভিন্ন শক্তির আলফাকণার অস্তিত্ব দেখতে পাওয়া যায়। এখানে ভূমিস্তরে Tl^{208} কেন্দ্রীনের শক্তি শূন্য ধরা হয়েছে এবং এই হিসাবেই অন্যান্য শক্তিস্তরগুলি আঁকা হয়েছে। যে আলফা বিকিরণের ফলে সন্তান কেন্দ্রীন এর ভূমিস্তরে উপনীত হয় সেই আলফাকণার শক্তি সর্ব্বাধিক হয়। পরীক্ষায় দেখা যায় যে, বিভিন্ন শ্রেণীর আলফাকণাগুলির মধ্যে শক্তির যে তারতম্য তা কোন না কোন গামারশ্মির শক্তির পরিমাণের সমান, 9·5 শক্তিস্তর চিত্রটি থেকে এর কারণ সহজেই অনুধাবন করা যায়। Bi^{212} ভিন্ন অন্যান্য আরও বহুসংখ্যক তেজস্ক্রিয় কেন্দ্রীনের ক্ষরণেও একাধিক শক্তিবিশিষ্ট আলফাকণা উৎপন্ন হতে দেখা যায়। কিন্তু আলফাকণার শক্তির সন্তত বিতরণ কোথাও লক্ষ্য করা যায় না, শুধু বিশেষ বিশেষ শক্তির আলফাকণাই সর্ব্বত্র দৃষ্ট হয়। Bi^{212} কেন্দ্রীনের ক্ষেত্রে নয়টি বিভিন্ন কিন্তু নির্দ্দিষ্ট শক্তির আলফাকণাগুচ্ছ দেখতে পাওয়া যায়, এদের মধ্যে প্রধান পাঁচটি এখানে দেখান হয়েছে। আলফা বিকিরণের এই প্রকৃতি অন্যান্য আলফা বিকিরণের ক্ষেত্রেও সত্য এবং এথেকে স্পষ্ট বোঝা যায় যে পরমাণুর শক্তিস্তরগুলির মত কেন্দ্রীনের শক্তিস্তরগুলিও কতগুলি বিশেষ বিশেষ কোয়াণ্টাম স্তরে অবস্থান করে।

আলফা ক্ষরণের তাত্ত্বিক সমস্যা

কেন্দ্রীনের আধান ধনাত্মক তেমনি আলফাকণারও, এজন্য আলফাকণা ও কেন্দ্রীনের মধ্যে বিচ্ছুরণের সময় কেন্দ্রীন আলফাকণাকে বিকর্ষণ করে। U^{238} কেন্দ্রীনের সঙ্গে আলফাকণার বিচ্ছুরণ ঘটিয়ে দেখা গেছে যে প্রায় 25 এমইভি পর্য্যন্ত শক্তিসম্পন্ন আলফাকণাও শুধুমাত্র কুলম্ব বলের প্রভাবেই বিচ্ছুরিত হয় অর্থাৎ 25 এমইভি আলফাকণাগুলিও এই কেন্দ্রীনের কুলম্ব বিকর্ষণী শক্তির প্রভাব অতিক্রম করতে পারে না। এই বিকর্ষণী শক্তিকে বলা হয় কুলম্ব প্রতিরোধ, এর পরিমাণ একটি সহজ গণনার দ্বারা মোটামুটি শুদ্ধভাবে নির্ণয় করা যায় যা উপরোক্ত পরীক্ষালব্ধ পরিমাণের সঙ্গে

সামঞ্জস্যপূর্ণ। একটি আলফাকণা ও একটি কেন্দ্রীনের মধ্যে কুলম্ব বিকর্ষণী শক্তির পরিমাণ হবে

$$V=\frac{(Z_1e)(Z_2e)}{R} \qquad \cdots \qquad 9.8$$

Z_1 এবং Z_2 যথাক্রমে আলফাকণা ও কেন্দ্রীনের পারমাণবিক সংখ্যা এবং R এদের কেন্দ্রদ্বয়ের মধ্যে দূরত্ব। যখন একটি আলফাকণা ও একটি U^{238} কেন্দ্রীন পরস্পর পরস্পরকে ঠিক স্পর্শ ক'রে আছে ঠিক সেই অবস্থায় এদের মধ্যে কুলম্ব বিকর্ষণী শক্তির পরিমাণ সর্বাধিক হবে ধরে নেওয়া যায় এবং তখন এদের কেন্দ্রদ্বয়ের মধ্যে দূরত্ব হয় $R=R_U+R_{He}$, অর্থাৎ এদের ব্যাসার্দ্ধদ্বয়ের যোগফলের সমান। সুতরাং এই অবস্থায় বিভব শক্তির পরিমাণ হয়

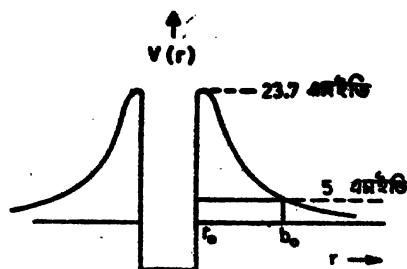
$$V=\frac{Z_1Z_2e^2}{R_U+R_{He}}=\frac{(2\times92)\times(4.8\times10^{-10})^2}{(1.4\times10^{-13})[238^{\frac{1}{3}}+4^{\frac{1}{3}}]}$$

$$=3.88\times10^{-5} \text{ আর্গ}=24.2 \text{ এমইভি}$$

এখানে ব্যাসার্দ্ধদ্বয়ের পরিমাণ নির্দ্ধারণের জন্য আমরা 7.1 সূত্রের সাহায্য নিয়েছি। স্পষ্টতঃই এভাবে কুলম্ব বিভবশক্তির যে পরিমাণ পাওয়া যায় তা পরীক্ষালব্ধ পরিমাণের সঙ্গে সামঞ্জস্যপূর্ণ। তুলনীয় পারমাণবিক সংখ্যা বিশিষ্ট অন্যান্য কেন্দ্রীনের ক্ষেত্রেও কুলম্ব প্রতিরোধ এই পরিমাণের নিকটবর্ত্তী, বিশেষ ক'রে $_{90}Th^{234}$ কেন্দ্রীনের ক্ষেত্রে এই পরিমাণ 23.7 এমইভি। সুতরাং আশা করা যায় যে, আলফাকণার শক্তি যখন এর চেয়ে অধিক হবে তখনই শুধু এটি কুলম্ব প্রতিরোধ অতিক্রম ক'রে কেন্দ্রীনের খুব নিকটে এসে এর অদূরপ্রসারী তীব্র বলগুলির সঙ্গে ক্রিয়া করতে পারবে।

কুলম্ব প্রতিরোধের এই সংক্ষিপ্ত বিবরণের পর এবার আমরা আলফা ক্ষরণের একটি জটিল তাত্ত্বিক সমস্যা সম্বন্ধে সংক্ষেপে আলোচনা করব। বহুদিন থেকেই বিজ্ঞানীরা এই তাত্ত্বিক জটিলতার বিষয় অবগত ছিলেন, 1928 খৃষ্টাব্দে বিজ্ঞানী গ্যামো (Gamow) প্রথম কোয়ান্টাম বলবিজ্ঞানের সাহায্যে এর যথার্থ ব্যাখ্যা দিতে সক্ষম হন, আমরা প্রথমে সংক্ষেপে সমস্যাটির একটি বিবরণ দেব। আমরা ধরে নেব যে আলফাক্ষরণক্ষম U^{238} কেন্দ্রীনের অভ্যন্তরে আলফাকণাটি নিরপেক্ষ একক একটি কণা হিসাবেই অবস্থান করে, এটি তখন সন্তান কেন্দ্রীনটির বলক্ষেত্রের আকর্ষণে যুক্ত থাকে। কেন্দ্রীনের দিকে অগ্রসর হবার সময় কণাটি যে বিভবের সম্মুখীন হয় তা 9.6 চিত্রের সাহায্যে দেখান হয়েছে, চিত্রটি সন্তান কেন্দ্রীন Th^{234}-এর কুলম্ব

প্রতিরোধকে নির্দেশ করে, এখানে r_0 রাশিটি আহিতকণা বিচ্ছুরণের সীমাকার মাপ। কেন্দ্রীনের ব্যাসার্ধের সমান এবং কেন্দ্রীনের বলগুলি r_0-এর চেয়ে অধিক দূরত্বে শূন্য হয়ে পড়ে এমন ধরে নেওয়া হয়েছে। যখন $r=r_0$ তখন কণাটি কেন্দ্রীনের বলসমূহের আওতায় এসে পড়ে, এই বলগুলি বিদ্যুৎচুম্বকীয় বলের তুলনায় বহুগুণ বেশী শক্তিশালী এবং এই ঘটনাটি বোঝাতে বিভবের লেখটি অতর্কিতে চরমবিন্দু থেকে নীচে নেমে এসেছে এমন দেখান হয়েছে, অর্থাৎ তখন থেকে কণাটি সম্পূর্ণই কেন্দ্রীনের বলের প্রভাবাধীন। বর্তমানক্ষেত্রে কুলম্ব প্রতিরোধের উচ্চতা 23·7 এমইভি। স্পষ্টতঃই কুলম্ব বিকর্ষণের জন্য এই শক্তির কম শক্তিবিশিষ্ট আলফাকণা U^{238} এর ক্ষরণোত্তর সন্তান কেন্দ্রীনের ভিতর প্রবেশ করতে পারে না, আবার কেন্দ্রীনের বলের আকর্ষণহেতু এর চেয়ে কম শক্তিবিশিষ্ট কণা ঐ কেন্দ্রীনের ভিতর থেকে বেরিয়েও আসতে পারে না। যেহেতু সন্তান কেন্দ্রীনের কুলম্ব বিকর্ষণী বিভবের পরিমাণ 23·7 এমইভি, আলফাকণাটি যদি শূন্য গতিশক্তি নিয়েও কেন্দ্রীনের ব্যাসার্ধের বাইরে বেরিয়ে আসতে সক্ষম হয় তাহলেও কুলম্ব বিকর্ষণের ফলে ক্রমাগত এর গতিশক্তি বৃদ্ধি পেতে থাকবে এবং যখন এটি বহুদূরে কুলম্ব বলের প্রভাবমুক্ত অঞ্চলে এসে

চিত্র 9·6

পড়েছে তখন এর শক্তি হবে 23·7 এমইভি। কিন্তু আশ্চর্য্যের বিষয়, আমরা জানি যে নির্গত আলফাকণার সর্ব্বাধিক শক্তি U^{238}-এর ক্ষরণের ক্ষেত্রে 5 এমইভিরও কম। উপরোক্ত আলোচনা এবং 9·6 চিত্র থেকে বোঝা যায় যে সনাতন পদার্থবিজ্ঞান অনুসারে 5 এমইভির কম শক্তিবিশিষ্ট একটি কণা ডান অথবা বাম কোন দিক থেকেই r_0 এবং b_0-এর মধ্যবর্ত্তী অঞ্চলে প্রবেশ করতে পারে না। অন্যান্য তেজস্ক্রিয় আলফা বিকিরকের ক্ষেত্রেও এই ঘটনাটি দৃষ্ট হয় অর্থাৎ নির্গত আলফাকণার সর্ব্বাধিক শক্তি, যে কুলম্ব-প্রতিরোধ এরা অতিক্রম করে আসে তার তুলনায় অনেক কম। আলফা

কণাটির ক্ষেত্রে যে তাত্ত্বিক সমস্যার কথা আমরা উল্লেখ করেছি তা এখানেই এবং সনাতন পদার্থবিজ্ঞান অনুযায়ী এর কোন ব্যাখ্যা পাওয়া যায় না।

কোয়ান্টাম বলবিজ্ঞান প্রয়োগ ক'রে অবশ্য এই প্রক্রিয়াটির ব্যাখ্যা দেওয়া সম্ভব হয়েছে কিন্তু সেই ব্যাখ্যার বিশদ বিবরণ দেবার সুযোগ এখানে নেই। শুধু বলা যায় যে এই তত্ত্ব অনুসারে কণাটির বিভবপ্রতিরোধ অতিক্রম করার একটি নির্দিষ্ট সম্ভাব্যতা রয়েছে। সনাতন পদার্থবিজ্ঞান অনুযায়ী আলফাকণা 9·6 চিত্রের বিভব প্রতিরোধের দেওয়াল সম্পূর্ণ অতিক্রম করতে পারলে তবেই কেন্দ্রীনের বাইরে বেরিয়ে আসতে সক্ষম হবে, কিন্তু কোয়ান্টাম বলবিজ্ঞান অনুযায়ী কণাটিকে প্রতিরোধের দেওয়ালের সময় উচ্চতা অতিক্রম করতে হয় না, এটি সরাসরি সুরঙ্গ ক'রে বাইরে বেরিয়ে আসতে পারে। 9·6 চিত্রে 5 এমইভি শক্তিসম্পন্ন কণাটি সরাসরি এভাবে কেন্দ্রীনের বলক্ষেত্রের বাইরে b_0 বা তদূর্ধ্ব দূরত্বে এসে হাজির হতে পারে এবং পরীক্ষাগারে ঐ শক্তিতেই আলফাকণাটিকে নির্গত হতে দেখা যাবে। কোয়ান্টাম বলবিজ্ঞানের সাহায্যে আরও দেখান যায় যে একটি আলফাকণা যখন কেন্দ্রীনের দিকে নিক্ষিপ্ত হয় তখন কেন্দ্রীনের কুলম্ব প্রতিরোধ এর শক্তির তুলনায় অধিক হলেও কণাটির ঐ প্রতিরোধ অতিক্রম ক'রে কেন্দ্রীনের অভ্যন্তরে প্রবেশ করার নির্দিষ্ট সম্ভাব্যতা থাকে। এজন্য দেখা গেছে যে এক এমইভি শক্তিবিশিষ্ট প্রোটন কয়েক এমইভি উঁচু কুলম্ব প্রতিরোধের দেওয়াল অতিক্রম ক'রে কেন্দ্রীনের মধ্যে বিক্রিয়া ঘটাতে পারে। শক্তি সংরক্ষণ নীতির সঙ্গে এই সুরঙ্গকরণ প্রক্রিয়ায় কোন অসামঞ্জস্য নেই, কারণ ক্ষরণের পূর্বে এবং ক্ষরণের পরে আলফাকণার শক্তি অভিন্ন থাকে, অর্থাৎ আলফা-কণাটি যদি কেন্দ্রীনের ভিতর 5 এমইভি শক্তি নিয়ে অবস্থান করে তবে ঠিক ঐ শক্তি নিয়েই এটি কেন্দ্রীনের বাইরে বেরিয়ে আসবে।

গাইগার নাটাল সূত্র (Geiger Nattal law)

আলফা ক্ষরণ সংক্রান্ত গবেষণা শুরু হবার প্রারম্ভেই গাইগার এবং নাটাল লক্ষ্য করেন যে, যেসমস্ত আলফাকণার শক্তি খুব বেশী তাদের অর্ধ-জীবনকাল খুব কম। এবং বিপরীতভাবে, যাদের বিস্ফোটন শক্তি যথেষ্ট কম তাদের অর্ধজীবনকাল অনেক বেশী। উদাহরণ হিসাবে বলা যায় Th^{232}, এর আলফা বিস্ফোটন শক্তি 4·05 এমইভি এবং ক্ষরণের অর্ধজীবনকাল $1{\cdot}39\times10^{10}$ বছর; আবার Po^{212} আইসোটোপের ক্ষেত্রে বিস্ফোটন শক্তি 8·95 এমইভি এবং অর্ধজীবনকাল 3×10^{-7} সেকেণ্ড। সুতরাং শক্তি দ্বিগুণ হওয়াতে অর্ধজীবনকালের পরিবর্তন হয়েছে প্রায় 10^{24}

অন্যান্য আলফাবিকিরকের ক্ষেত্রেও দেখা যায় যে, যদি বিস্ফোটন শক্তি এই উপরোক্ত দুই পরিমাণের অন্তর্বর্তী হয় তবে তাদের অর্দ্ধজীবনকালও এদের দুই অর্দ্ধজীবনকালের অন্তর্বর্তী হবে। স্পষ্টতঃই অর্দ্ধজীবনকাল বিস্ফোটনশক্তির ব্যস্ত রাশি হিসাবে পরিবর্ত্তিত হয় এবং ক্ষরণধ্রুবক যা অর্দ্ধজীবনকালের ব্যস্ত অনুপাতী তা বিস্ফোটনশক্তির সঙ্গে সরাসরি এবং অত্যন্ত দ্রুত পরিবর্ত্তিত হয়। এইসব পরীক্ষালব্ধ তথ্যগুলি গাইগার নাটাল সূত্রের আকারে প্রকাশিত, এইসব ভারী কেন্দ্রীনগুলির ক্ষেত্রে বিস্ফোটনশক্তি এবং আলফাকণার শক্তির ভিতর পার্থক্য খুব সামান্য এবং সূত্রটি নিম্নলিখিতভাবে বিবৃত করা যায়; যদি বিভিন্ন তেজস্ক্রিয় কেন্দ্রীনগুলির আলফা ক্ষরণ ধ্রুবকের লগ বনাম আলফাকণার দৌড়দূরত্বের লগের একটি লেখ আঁকা যায় তবে মোটামুটি একটি সরলরেখা হবে, অর্থাৎ

$$\log \lambda = A \log R + B \qquad \cdots \qquad 9.9$$

এখানে A এবং B ধ্রুবক, A হ'ল লেখটির আপতন এবং তিনটি প্রকৃতিলব্ধ তেজস্ক্রিয় শ্রেণীর ক্ষেত্রে এর পরিমাণ প্রায় সমান কিন্তু B বিভিন্ন, সুতরাং ঐ তিনটি শ্রেণীর ক্ষেত্রে রেখাগুলি মোটামুটি হয় তিনটি সমান্তরাল সরলরেখা। আমরা পূর্ব্বে বলেছি যে গড় দৌড়দূরত্ব অধিকাংশ ক্ষেত্রেই $E^{3/2}$ এর সমানুপাতী (9·5 সূত্র) সুতরাং 9·9 সূত্রটিকে আমরা লিখতে পারি

$$\log \lambda = C \log E + D \qquad \cdots \qquad 9.10$$

এথেকে আমরা ক্ষরণ ধ্রুবকের এবং শক্তির লগের মধ্যে সরল সম্বন্ধটি পাই। 9·9 সূত্রের সাহায্যে আলফাকণার দৌড়দূরত্ব পরিমাপ ক'রে তাথেকে ক্ষরণের অর্দ্ধজীবনকালের একটা মোটামুটি শুদ্ধ পরিমাণ নির্ণয় করা যায়।

কোয়ান্টাম বলবিজ্ঞানের সাহায্যে আলফা ক্ষরণের যে ব্যাখ্যা দেওয়া হয়েছে তাথেকে গাইগার নাটাল সূত্রটি একটি সরলীকরণ হিসাবে উদ্ধার করা যায়। এই সূত্রটি অবশ্য খুব নির্ভুলভাবে পালিত হয় না, তবে যদি সেইসব কেন্দ্রীনের জন্য গাইগার নাটাল সূত্র প্রকাশ করা যায় যাদের Z অভিন্ন এবং Z ও N উভয়ই যুগ্ম তবে সুন্দর সরলরেখা পাওয়া যায়। অন্যান্য ক্ষেত্রে যদিও মোটামুটি গাইগার নাটাল সূত্রের নির্দেশনটি বজায় থাকে কিন্তু বিন্দুগুলি খুব ভালভাবে সরলরেখার উপর থাকে না।

বিটা ক্ষরণ

আলফা ক্ষরণের মত বিটা ক্ষরণেও কেন্দ্রীনের রূপান্তর ঘটে, সচরাচর কেন্দ্রীন থেকে একটি ইলেকট্রন নির্গত হয়ে আসে এবং ফলে কেন্দ্রীনের একটি নিউট্রন প্রোটনে রূপান্তরিত হয় অর্থাৎ পারমাণবিক সংখ্যা এক বৃদ্ধি পায়।

অনেক সময় কোন কেন্দ্রীনের ভিতর নিউট্রনসংখ্যার অত্যধিক আধিক্য হলে কেন্দ্রীনটি বিটাক্ষরণক্ষম হয়ে পড়ে, কারণ তখন বিটা ক্ষরণের দ্বারা নিউট্রনসংখ্যা কমিয়ে ফেলে এটি পুনরায় স্থিতিশীল অবস্থায় ফিরে আসতে পারে। তবে কৃত্রিম উপায়ে যেসব তেজস্ক্রিয় আইসোটোপ প্রস্তুত হয়েছে তাদের কোন কোনটির মধ্যে পজিট্রন ক্ষরণ লক্ষ্য করা যায় একথা আগেই বলা হয়েছে। সেক্ষেত্রে একটি প্রোটন নিউট্রনে রূপান্তরিত হয় এবং কেন্দ্রীনের পারমাণবিক সংখ্যা এক কমে যায়। বিটা ক্ষরণে প্রোটন ও নিউট্রনসংখ্যার পরিবর্তন ঘটলেও ভরসংখ্যা অপরিবর্তিত থাকে।

বিটাকণা কেন্দ্রীনের অভ্যন্তরে অবস্থান করে না, ক্ষরণ মুহূর্তে কেন্দ্রীনের ভিতর এটির সৃষ্টি হয়। এই দিক থেকে আলফা ক্ষরণের সঙ্গে বিটা ক্ষরণের মৌলিক পার্থক্য আছে, কারণ আমরা পূর্বে আলফা ক্ষরণের বিবরণ দেবার সময় দেখেছি যে সেখানে আলফাকণাটি সবসময়ই একটি পৃথক কণা হিসাবে নিরপেক্ষভাবে কেন্দ্রীনের ভিতর অবস্থান করে এরকম ধ'রে নেওয়া হয়েছে। ইলেকট্রন যে কেন্দ্রীনের ভিতর নিরপেক্ষভাবে অবস্থান করতে পারে না এর স্বপক্ষে বহু যুক্তি আছে। বিভিন্ন কেন্দ্রীনের চৌম্বক ভ্রামক নানারকম পরীক্ষায় মাপা যায়। ঐসব পরিমাপ থেকে জানা যায় যে এদের পরিমাপ নিউট্রন এবং প্রোটনের চৌম্বক ভ্রামকের সঙ্গে তুলনীয়, কিন্তু তৃতীয় অধ্যায়ে আমরা দেখেছি যে ইলেকট্রনের চৌম্বক ভ্রামক প্রোটন বা নিউট্রনের তুলনায় বহুশতগুণ বড়। কেন্দ্রীনের ভিতর ইলেকট্রন না থাকার স্বপক্ষে এটি একটি জোরাল যুক্তি। এছাড়া ইলেকট্রন যদি কেন্দ্রীনের ভিতর অবস্থান করে তবে তার অর্থ হবে এই যে, ইলেকট্রনের ডিব্রগলি তরঙ্গদৈর্ঘ্য কেন্দ্রীনের ঐ সঙ্কীর্ণ আয়তনের অন্ততঃ সমান হবে, কিন্তু সেক্ষেত্রে ইলেকট্রনের ভরবেগ ও শক্তি হবে অস্বাভাবিক বেশী। পরীক্ষায় দেখা যায় যে কেন্দ্রীনের সঙ্গে ইলেকট্রনের পারিক্রিয়া শুধুমাত্র বিদ্যুৎচুম্বকীয় বলগুলির মাধ্যমে ঘটে। বিদ্যুৎ-চুম্বকীয় বলের দ্বারা এত অধিক শক্তিবিশিষ্ট ইলেকট্রন কিভাবে কেন্দ্রীনের ভিতর আবদ্ধ থাকবে তা কল্পনা করা দুরূহ। এইসব দৃষ্টান্ত থেকে সহজেই প্রতীয়মান হয় যে কেন্দ্রীনের অভ্যন্তরে ইলেকট্রনের স্বতন্ত্র অস্তিত্ব খুবই অস্বাভাবিক, অর্থাৎ বিটা ক্ষরণের সময় কেন্দ্রীনের ভিতর ইলেকট্রন সৃষ্টি হয় এই ধারণাই সম্পূর্ণ যুক্তিযুক্ত।

এখন দেখা যাক বিটা ক্ষরণের ক্ষেত্রে শক্তিসংরক্ষণ নীতিটি কি রূপ নেয়। বিটা ক্ষরণ প্রক্রিয়াটি নিম্নলিখিতভাবে প্রকাশ করা যেতে পারে

$${}_{z}P^{A} \rightarrow {}_{z}D^{A} + e^{-} + Q$$

এখানে P এবং D যথাক্রমে ক্ষরণশীল এবং ক্ষরণোত্তর কেন্দ্রীন এবং Q হ'ল বিটা ক্ষরণের Q পরিমাণ। নির্গত শক্তির পরিমাণ দু'দিকের ভরের পার্থক্যের সমান

$$Q=[N_P-N_D-m_e]c^2$$

এক্ষেত্রে N_P এবং N_D যথাক্রমে P ও D কেন্দ্রীনদ্বয়ের ভর; বর্তমানে শুধু কেন্দ্রীনের ভর বোঝাতে আমরা 'N' অক্ষরটি ব্যবহার করব, সমগ্র পরমাণুর ভর বোঝাবার জন্য 'M' অক্ষরটি ব্যবহৃত হবে। নির্গত শক্তির পরিমাণ কেন্দ্রীনের ভরের মাধ্যমে প্রকাশ না ক'রে সমগ্র পরমাণুর ভরের মাধ্যমে নিম্নলিখিত উপায়ে প্রকাশ করা যায়

$$Q=[M_P-Zm_e-\{M_D-(Z+1)m_e\}-m_e]c^2$$
$$=[M_P-M_D]c^2 \qquad \cdots \quad 9{\cdot}11$$

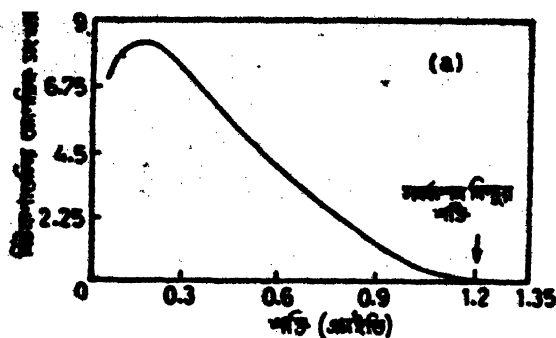
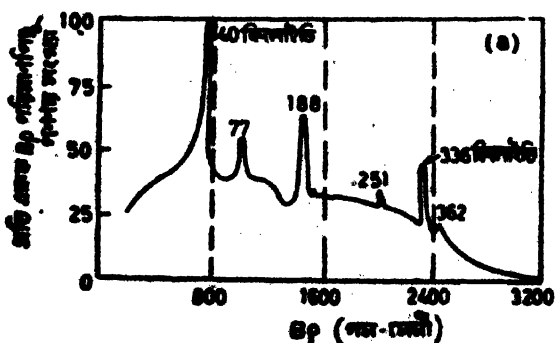
এই সূত্রটি পেতে অবশ্য আমরা পরমাণুর ভিতর ইলেকট্রনগুলির বন্ধনশক্তি অবহেলা করেছি, তবে এই অবহেলার জন্য শেষ পর্য্যন্ত যে শুদ্ধীকরণ রাশির উদ্ভব হয় তার পরিমাণ খুবই নগণ্য। সুতরাং Q-পরিমাণ হ'ল ক্ষরণপূর্ব্ব এবং ক্ষরণোত্তর পরমাণুদ্বয়ের ভরের পার্থক্যের সমতুল্য শক্তির পরিমাণ এবং যখন ক্ষরণশীল পরমাণুর ভর ক্ষরণোত্তর সন্তানের ভরের তুলনায় অধিক হয় তখনই শুধু ইলেকট্রন বিটা ক্ষরণ সম্ভব।

নিউট্রিনো (Neutrino)

শক্তিসংরক্ষণ নীতি প্রয়োগের দ্বারা বিটা ক্ষরণের Q-পরিমাণ নির্ণীত হয়, একইভাবে ভরবেগ সংরক্ষণের ফলাফল সম্বন্ধেও ভবিষ্যদ্‌বাণী করা যায়। আমরা আলফা ক্ষরণের ক্ষেত্রে দেখেছি যে, এই দ্বিদেহ ক্ষরণে ক্ষরণোত্তর কণাগুলির ভরবেগ এবং শক্তি নির্দ্দিষ্ট ধ্রুব পরিমাণের থাকে। বিটা ক্ষরণ যদি দ্বিদেহ ক্ষরণ হয় তবে আলফা ক্ষরণের ক্ষেত্রে যে গণনা প্রয়োগ করা হয়েছিল তা এক্ষেত্রেও প্রযুক্ত হবে এবং যেহেতু ইলেকট্রনের ভর কেন্দ্রীনের তুলনায় বহুসহস্র বা লক্ষ গুণ কম সেজন্য বিটা ক্ষরণে মোট নিঃসারিত শক্তির সমস্তই প্রায় ইলেকট্রনের ভিতর সঞ্চারিত হবে। এই তথ্যটি আলফা ক্ষরণের ক্ষেত্রে ব্যবহৃত 9·2 সূত্র থেকেই প্রতীয়মান হয়। বিটা ক্ষরণের জন্য আমরা লিখতে পারি

$$M_D T_D = m_e T_e$$

এখানে T_D ও T_e যথাক্রমে পিছুহটা কেন্দ্রীন ও ইলেকট্রনের গতিশক্তি, যেহেতু $m_D > m_e$, সুতরাং $T_e > T_D$ এবং

$$Q=T_D+T_e \simeq T_e$$

...তে কত সংখ্যায় বিটাকণা বিকিরিত হচ্ছে তা মাপা হয়, 9·7 ... এদের সংখ্যা বনাম গতিশক্তির লেখ কিরকম প্রকৃতির হয় তা দেখান হয়েছে। দুটি স্বতন্ত্র লেখচিত্র দেখান হয়েছে এবং এই উভয়প্রকারের লেখই বিটা ক্ষরণের পরীক্ষায় লক্ষ্য করা যায়, এদের মূল বৈশিষ্ট্য হচ্ছে যে নির্গত ইলেকট্রনের শক্তি সন্ততভাবে বিতরিত এবং বিভিন্ন শক্তিতে আবির্ভূত ইলেকট্রনগুলির সংখ্যা বিভিন্ন। পজিট্রন ক্ষরণেও এই ধরণেরই লেখ পাওয়া যায়। 9·7(b) চিত্রের লেখটির বৈশিষ্ট্য হচ্ছে এই যে এখানে সন্তত বিতরণের মাঝে বিশেষ বিশেষ শক্তিতে কতগুলি শিখর লক্ষিত হচ্ছে, অর্থাৎ ঐসব শক্তিতে অতিরিক্ত পরিমাণে ইলেকট্রন নির্গত হয়ে থাকে। এইসব শিখরগুলি অবশ্য ভিন্ন প্রক্রিয়ার দ্বারা সৃষ্টি হয়। বিটাক্ষরণোত্তর সন্তান কেন্দ্রীনটি অনেকসময়ই উত্তেজিত শক্তিস্তরে অবস্থান করে এবং পরিশেষে গামারশ্মি বিকিরণ করে। তবে কেন্দ্রীনের উত্তেজনাশক্তি অনেকসময় গামারশ্মি হিসাবে বিকিরিত না হয়ে কোন একটি কক্ষীয় ইলেকট্রনের উপর আরোপিত হয় এবং ঐ শক্তির প্রভাবে ইলেকট্রনটি তখন পরমাণুর ভিতর থেকে নির্গত হয়ে আসে। এই প্রক্রিয়াকে বলা হয় অন্তর্নিহিত পটপরিবর্তন, গামারশ্মি সম্বন্ধে আলোচনার সময় আমরা এই প্রক্রিয়াটি সম্বন্ধে আরও বিশদভাবে আলোচনা করব। গামারশ্মি বিকিরণ এবং অন্তর্নিহিত পটপরিবর্তন সাথে সাথেই ঘটতে পারে। নির্গত গামারশ্মির শক্তি যদি $h\nu$ হয় এবং K, L ইত্যাদি সেলগুলিতে আবদ্ধ ইলেকট্রনের বন্ধনশক্তি যদি যথাক্রমে E_k, E_L ইত্যাদি হয়, তবে অন্তর্নিহিত পটপরিবর্তনজাত ইলেকট্রনের শক্তি হবে যথাক্রমে $h\nu - E_k$, $h\nu - E_L$, $\cdots$ ইত্যাদি, এবং ঐসব শক্তিতে অতিরিক্ত ইলেকট্রন নির্গত হওয়ার ফলে এক একটি শিখর লক্ষিত হবে। বিটাক্ষরণজাত কেন্দ্রীনের একাধিক গামারশ্মিস্তর থাকতে পারে, সুতরাং এভাবে বহুসংখ্যক শিখর সৃষ্টি হওয়া সম্ভব। এই শিখরগুলিকে যদি বাদ দেওয়া যায় তবে প্রত্যেকক্ষেত্রেই শক্তি ও সংখ্যার বিতরণ 9·7(a) লেখচিত্রটির মতই দেখাবে। বস্তুতঃ আসল বিটা ক্ষরণের সঙ্গে এই অন্তর্নিহিত পটপরিবর্তনজাত ইলেকট্রনের শিখরগুলির কোন সম্পর্ক নেই, এজন্য এগুলি সম্বন্ধে আমরা আপাততঃ আলোচনা করব না। যেসব ক্ষেত্রে বিটা ক্ষরণের পর গামারশ্মি সৃষ্টি হয় না, সেগুলির ক্ষেত্রে কোন অন্তস্থ পটপরিবর্তিত ইলেকট্রন আবির্ভাবের সম্ভাবনা নেই এবং সংখ্যা বনাম শক্তির লেখটি ঠিক 9·5(a) চিত্রের মত সন্তত এবং মসৃণ হতে দেখা যায়।

প্রত্যেক ক্ষেত্রেই শক্তি বিতরণের রেখাটি $T_e = O$ থেকে শুরু হয়ে $T_e = O$ তে গিয়ে শেষ হয়, দেখা যায় যে চরম T_e এর পরিমাণ সবসময়ই

Q-এর সমান অর্থাৎ এই চরম ইলেকট্রন শক্তির জন্য দ্বিদেহ ক্ষরণের প্রকল্প থেকে প্রাপ্ত ফলাফল যথার্থ, যদিও লেখটি থেকে লক্ষ্য করা যায় যে অতি অল্প-সংখ্যক কণাই Q পরিমাণ শক্তিসহ নির্গত হয়। বিটা ক্ষরণে ইলেকট্রনগুলির শক্তির এই সন্তত বিতরণের ঘটনাটি বহুদিন থেকে বিজ্ঞানীদের বিস্মিত ক'রে রেখেছিল। যেহেতু শক্তি ও ভরবেগ সংরক্ষণের নীতি অনুসারে ক্ষরিত ইলেকট্রনের শক্তি ও ভরবেগ বিশেষ নির্দিষ্ট পরিমাণ ভিন্ন অন্য কিছু হতে পারে না, সুতরাং ক্ষরিত ইলেকট্রনের সন্তত বিতরণ ঘটতে থাকলে ঐ সংরক্ষণ নীতিগুলি বিসর্জন দিতে হয়। বিটা ক্ষরণের ফলে কেন্দ্রীনের যে সামান্য পশ্চাদপসরণ হয় তা পরীক্ষা ক'রেও দেখা গেছে যে, ঐ পশ্চাদপসরণের গতিবেগ ভরবেগ সংরক্ষণের সূত্রের সঙ্গে সামঞ্জস্যপূর্ণ নয়। কিন্তু শক্তি ও ভরবেগ সংরক্ষণ বিজ্ঞানের দুটি অন্যতম প্রধান নীতি, এদের বাদ দিলে বিজ্ঞান-জগতের অধিকাংশ নিয়মাবলী এবং প্রক্রিয়ার কোন ব্যাখ্যাই পাওয়া যায় না। বিজ্ঞানীরা নানাভাবে বিটা ক্ষরণের এই রহস্য ভেদ করার চেষ্টা করেছেন। পদার্থের ভিতর শোষিত হয়ে যাতে বিটাকণাগুলির শক্তি পরিবর্তিত হয়ে যেতে না পারে সেজন্য খুব পাতলা প্রলেপের আকারে বিটাক্ষরণশীল তেজস্ক্রিয় উৎস নিয়ে পরীক্ষা করা হয়েছে, কিন্তু সর্বত্রই একই ধরণের সন্তত বিতরণ লক্ষিত হয়েছে। ক্ষরণের ফলে উৎপন্ন কণাগুলির মোট তাপীয় শক্তি পরিমাপ ক'রেও বিটাকণাগুলির গড় শক্তি নির্ণয় করা যায়, দেখা যায় যে এভাবে নির্ণীত গড় শক্তি এবং বিটাকণার শক্তিবর্ণালী মাপনী দ্বারা প্রাপ্ত কণাগুলির গড় শক্তি পরস্পর অভিন্ন।

বিটা ক্ষরণের এই অস্বাভাবিক সমস্যার প্রথম সুষ্ঠু সমাধান দিলেন বিজ্ঞানী পাউলি। ইনি প্রস্তাব করলেন যে, বিটা ক্ষরণের সময় কেন্দ্রীনের ভিতর থেকে ইলেকট্রনের সাথে সাথে আরও একটি কণা উৎপন্ন হয়ে বেরিয়ে আসে যার ভর শূন্য, কিন্তু কণাটি নির্দিষ্ট শক্তি ও ভরবেগ বহন করতে পারে। এই কণাটির নাম দেওয়া হয়েছে নিউট্রিনো, এর প্রকৃতি সম্বন্ধে পূর্বে আমরা কিছু আলোচনা করেছি। নিউট্রিনো তত্ত্ব অনুসারে বিটা ক্ষরণ আসলে একটি ত্রিদেহ ক্ষরণ অর্থাৎ বিটা ক্ষরণের ফলে কেন্দ্রীনটি তিনটি কণায় বিভক্ত হয়, ঐগুলি হ'ল যথাক্রমে একটি ক্ষরণোত্তর নূতন কেন্দ্রীন, একটি বিটাকণা এবং একটি নিউট্রিনো। দ্বিদেহ ক্ষরণ ঘটলে ইলেকট্রনের শক্তি ও ভরবেগ হবে ধ্রুব পরিমাণের কিন্তু ত্রিদেহ ক্ষরণের ক্ষেত্রে সেটা আর সত্য নয়। তখন মোট নিঃসারিত শক্তি ইলেকট্রন ও নিউট্রিনোর মধ্যে বিতরিত থাকে (ক্ষরণোত্তর সন্তান কেন্দ্রীনের গতিশক্তির পরিমাণ

[illegible])। মোট শক্তি ইলেকট্রন ও নিউট্রিনোর মধ্যে ভাগাভাগি হয়ে যায় ব'লে উভয়েরই শক্তি সন্ততভাবে বিতরিত থাকতে পারে। এইভাবে শক্তি ও ভরবেগ বজায় রেখে বিটাকণার শক্তির সন্তত বিতরণের সমস্যার সমাধান সম্ভব। নিউট্রিনো ভরশূন্য এজন্য যখন নির্গত নিউট্রিনোর শক্তি খুবই অল্প তখন মোট নিঃসারিত শক্তি বিটাকণার দ্বারাই বাহিত হয়, এজন্য শক্তি বিতরণ লেখটির ভিতর ইলেকট্রনের সর্ব্বোচ্চ শক্তির পরিমাণ Q। আবার ইলেকট্রনের সর্ব্বনিম্ন গতিশক্তি শূন্য তখন বাকী সমস্ত শক্তি নিউট্রিনোর দ্বারা বাহিত হয়।

কেন্দ্রীন বিজ্ঞানে নিউট্রিনো একটি অত্যাশ্চর্য্য আবিষ্কার, এর ভর ও আধান শূন্য এবং পদার্থের উপর এর ক্রিয়া অতি নগণ্য। আলোককণারও ভর এবং আধান শূন্য কিন্তু পদার্থের উপর এর ক্রিয়া মোটেই নগণ্য নয়, আলোককণা বহুবিধ প্রক্রিয়ার দ্বারা এর অস্তিত্ব সহজেই প্রকটিত করে। আলোককণার তুলনায় নিউট্রিনোর ক্রিয়াশীলতা নেহাৎই কম। নিউট্রিনো পৃথিবীর তলের একপ্রান্ত দিয়ে অভ্যন্তরে প্রবেশ ক'রে অভ্যন্তরস্থ পদার্থের সঙ্গে কোন ক্রিয়া না ক'রে অপর প্রান্ত দিয়ে বেরিয়ে আসতে পারে। এইসব কারণে সরাসরিভাবে নিউট্রিনোর অস্তিত্ব প্রদর্শন করা অতীব দুরূহ, শুধু অপ্রত্যক্ষ উপায়ে যেমন বিটা ক্ষরণের বিশ্লেষণের দ্বারা এর অস্তিত্ব সম্বন্ধে অবহিত হওয়া যায়। তবে বর্ত্তমানে কেন্দ্রীনের বিটা ক্ষরণ ছাড়াও অন্যান্য কতগুলি পরীক্ষায় নিউট্রিনো ঘটিত বিক্রিয়ার মাধ্যমে এর অস্তিত্ব প্রদর্শন করা সম্ভব হয়েছে। বিটা ক্ষরণে কৌণিক ভরবেগের নিত্যতা বজায় রাখতে গেলে নিউট্রিনোর ঘূর্ণি $\frac{1}{2}\hbar$ ধরা আবশ্যক। উদাহরণস্বরূপ ${}_5B^{12}$ আইসোটোপের বিটা ক্ষরণ বিবেচনা করা যেতে পারে, ক্ষরণের ফলে এটি ${}_6C^{12}$ আইসোটোপে রূপান্তরিত হয়। বিভিন্ন পরীক্ষায় এই দুই আইসোটোপের কেন্দ্রীনের মোট কৌণিক ভরবেগ মাপা যায়, উপরোক্ত কেন্দ্রীনদ্বয়ের ঘূর্ণি যথাক্রমে 1 এবং 0। উভয়েরই ঘূর্ণি পূর্ণসংখ্যায় প্রকাশিত এবং ইলেকট্রনের ঘূর্ণি $\frac{1}{2}$, সুতরাং কৌণিক ভরবেগ সংরক্ষণের জন্য নিউট্রিনোর ঘূর্ণি হতে হবে $\frac{1}{2}$।

প্রত্যেকটি বিভিন্ন বিটা ক্ষরণেই দেখা যায় যে নিউট্রিনোর ঘূর্ণির পরিমাণ যদি হয় $\frac{1}{2}$ তবে কৌণিক ভরবেগ সংরক্ষিত হতে পারে। আরেকটি বিখ্যাত বিটা ক্ষরণ হ'ল নিউট্রনের বিটা ক্ষরণ; এক্ষেত্রেও নিউট্রন, প্রোটন ও ইলেকট্রন প্রত্যেকের ঘূর্ণি $\frac{1}{2}$, সুতরাং নিউট্রিনোর ঘূর্ণিও $\frac{1}{2}$ হওয়া আবশ্যক। এই সিদ্ধান্তটি 5·7 সমীকরণটিতে কৌণিক ভরবেগ যোগকরণের যে সূত্র দেওয়া হয়েছে তা থেকেই প্রতীয়মান হয়। নিউট্রিনোর অস্তিত্ব স্বীকার করলে

বিটা করণে শক্তি, ভরবেগ এবং কৌণিক ভরবেগ সংরক্ষণের সমস্যা অতি সহজেই সমাধান হয়ে যায়। নিউট্রিনোর অস্তিত্বের ফলে বিটা করণে Q-পরিমাণের একটি অংশ এর দ্বারা বাহিত হয়, কিন্তু যেহেতু নিউট্রিনোর পারিক্রিয়া অতীব সামান্য এই অংশটি শক্তি হিসাবে আত্মপ্রকাশ করে না। পারিক্রিয়া খুবই সামান্য ব'লে নিউট্রিনো বাহিত শক্তিকে সম্পূর্ণ অপচারিত হিসাবে গণ্য করা হয়ে থাকে। ত্রিদেহ করণের ক্ষেত্রে 9·2—9·4 সমীকরণগুলির পরিবর্তন আবশ্যক। এক্ষেত্রে ভরবেগ সংরক্ষণের সূত্রটি অপেক্ষাকৃত জটিলতর সর্তের দ্বারা প্রকাশিত হয়।

পজিট্রন করণ

আমরা আগেই বলেছি যে কোন কোন কেন্দ্রীনের বিটা করণে পজিট্রনের নির্গমন হয়, একটি উদাহরণ হ'ল

$$ {}_{7}N^{13} \rightarrow {}_{6}C^{13} + e^{+} + Q $$

এরকম আরও অনেকগুলি উদাহরণ পরবর্তী অধ্যায়ে দেওয়া হবে। প্রকৃতিজাত তেজস্ক্রিয় পদার্থের ভিতর পজিট্রনের নির্গমন দৃষ্ট হয় না কিন্তু পজিট্রন বিকিরক তেজস্ক্রিয় আইসোটোপগুলি কৃত্রিম উপায়ে প্রস্তুত করা যায়। পজিট্রনের নির্গমন প্রক্রিয়াটি নিম্নলিখিতভাবে উপস্থাপিত করা যায়

$$ {}_{Z}P^{A} \rightarrow {}_{Z-1}D^{A} + e^{+} + Q $$

এখানেও নিউট্রিনোর শক্তি Q-এর একটি অংশ হিসাবে গণ্য করা হয়েছে। ঠিক 9·11 সূত্রের অনুকরণে শক্তি সংরক্ষণ নীতিটি যদি পরমাণুর ভরের মাধ্যমে লেখা যায় তবে আমরা পাই

$$ Q = [M_P - Zm_e - M_D + (Z-1)m_e - m_e]c^2 $$

$$ = [M_P - M_D - 2m_e]c^2 \qquad \cdots \qquad 9{\cdot}12 $$

সুতরাং পজিট্রন করণ শুধু তখনই সম্ভব যখন

$$ M_P > M_D + 2m_e \qquad \cdots \qquad 9{\cdot}13 $$

এখানে M সমস্ত পরমাণুটির ভরকে নির্দেশ করে এবং পরমাণুর ভিতর ইলেকট্রনের বন্ধনশক্তিকে যথারীতি অবহেলা করা হয়েছে। সুতরাং যদি পজিট্রন করণ ঘটতে হয় তবে জনক কেন্দ্রীন ও সন্তান কেন্দ্রীনের ভিতর ভরের পার্থক্য $2m_e$ এর অধিক হওয়া প্রয়োজন। এক্ষেত্রে দুটি ইলেকট্রনের ভরের আবির্ভাব ঘটে তার কারণ পজিট্রন করণের ফলে জনক পরমাণুর কেন্দ্রীনের আধান এক কমে যায় এবং অতিরিক্ত ইলেকট্রনটি তখন পরমাণুর

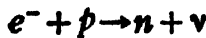
ভিতর থেকে বিচ্যুত হয়ে যায়, অর্থাৎ মোটের উপর এই ক্ষরণের দ্বারা পরমাণুর ভর $2m_e$ পরিমাণ হ্রাস পায়। বিকিরিত পজিট্রনগুলির শক্তির বর্ণালী ঠিক ইলেকট্রন ক্ষরণেই অনুরূপ।

ইলেকট্রন আহরণ (electron capture)

কিছু কিছু পরমাণু আছে যাদের মধ্য থেকে সরাসরি বিটা ক্ষরণ হয় না, এর পরিবর্তে পরমাণু কেন্দ্রীনটি একটি কক্ষীয় ইলেকট্রন আহরণ করে এবং এর ফলে একটি নিউট্রিনো উৎপন্ন হয়ে নির্গত হয়; একটি উদাহরণ হ'ল

$${}_4Be^7 + e^- \rightarrow {}_3Li^7 + \nu \qquad T_{\frac{1}{2}} = 53 \text{ দিন}$$

এইসব ক্ষেত্রে আসলে যে বিক্রিয়াটি হয় তা হ'ল একটি প্রোটন একটি ইলেকট্রন শোষণ ক'রে নিউট্রনে রূপান্তরিত হয় এবং সঙ্গে সঙ্গে একটি নিউট্রিনোরও সৃষ্টি হয়

$$e^- + p \rightarrow n + \nu$$

উৎপন্ন নিউট্রনটি কেন্দ্রীনের ভিতরই অবস্থান করে, শুধু নিউট্রিনোটি নির্দিষ্ট শক্তি নিয়ে বেরিয়ে যায়। K-সেলের ইলেকট্রনগুলি যেগুলি কেন্দ্রীনের খুবই নিকটে অবস্থান করে এদের আহরিত হবার সম্ভাবনাই সর্বাধিক, এই কারণে এই আহরণ প্রক্রিয়াকে অনেক সময় K-আহরণ আখ্যা দেওয়া হয়। যেহেতু ইলেকট্রন আহরণের ফলে শুধু একটি নিউট্রিনো উৎপন্ন হয় এবং আহরিত ইলেকট্রনটি ক্ষরণশীল পরমাণুর ভিতর থেকেই আসে, এই ধরণের ক্ষরণ হ'ল দ্বিদেহ ক্ষরণ অর্থাৎ যে নিউট্রিনোটি বেরিয়ে আসে তার শক্তি ও ভরবেগ নির্দিষ্ট। এই ধরণের ক্ষরণের ফলে পরমাণুটি যে বিপরীতমুখী ভরবেগ প্রাপ্ত হয় তার পরিমাণ সামান্য কিন্তু তাহলেও স্পর্শকাতর আয়োজনের দ্বারা তা মাপা সম্ভব এবং এভাবে দেখা যায় যে একটি বিশেষ আহরণ প্রক্রিয়ার ক্ষেত্রে এই পশ্চাদ্‌মুখী ভরবেগের পরিমাণ ধ্রুব। ইলেকট্রন আহরণ প্রক্রিয়ার ভরের ও শক্তির সম্বন্ধটি নিম্নরূপ

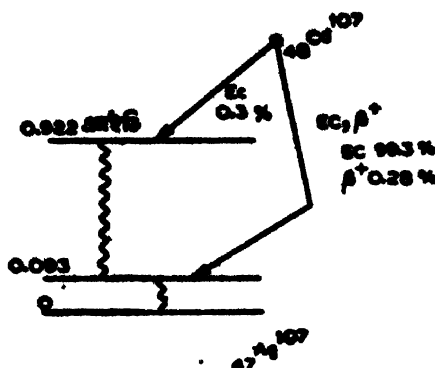
$$N(A, Z) + m_e = N(A, Z-1) + Q$$

এখানে Q নির্গত নিউট্রিনোর শক্তি, এবং ইলেকট্রনের ভরের তুলনায় এর বন্ধনশক্তিকে অবহেলা করা হয়েছে। উভয়দিকে $(Z-1)m_e$ পরিমাণ ভর যোগ ক'রে আমরা লিখতে পারি

$$N(A, Z) + (Z-1)m_e + m_e = N(A, Z-1) + (Z-1)m_e + Q$$

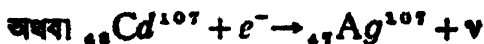
$$M(A, Z) = M(A, Z-1) + Q$$

অর্থাৎ, $Q = [M(A, Z) - M(A, Z-1)]c^2$ আর্গ ... 9·14

সুতরাং ইলেকট্রন আহরণ প্রক্রিয়ার যে পরিমাণ শক্তি নির্গত হয় তা হ'ল উভয় আইসোটোপের ভরের পার্থক্যের পরিমাণ এবং c^2-এর গুণফল। যেসব কেন্দ্রীনে ইলেকট্রন আহরণ ঘটে তাদের মধ্য থেকে পজিট্রন বিকিরণও

চিত্র 9·8 : Cd^{107} আইসোটোপের ক্ষরণে ইলেকট্রন আহরণ ও পজিট্রন বিকিরণ।

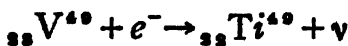
ঘটতে পারে কারণ উভয় প্রক্রিয়াই একটি প্রোটনকে নিউট্রনে রূপান্তরিত করে। কিন্তু পজিট্রন বিকিরণের জন্য আমরা দেখেছি যে জনক ও সন্তান পরমাণুদ্বয়ের ভরের পার্থক্য $2m_e$ এর অধিক হওয়া প্রয়োজন। সুতরাং এর কম হলে শুধু ইলেকট্রন আহরণই ঘটতে থাকবে, অধিক হলে উভয় প্রক্রিয়ারই ঘটার সম্ভাবনা থাকবে। ${}_{48}Cd^{107}$ আইসোটোপের ক্ষরণে ইলেকট্রন আহরণ কিংবা পজিট্রন নির্গমন দুইই ঘটতে দেখা যায়, 9·8 ছবিতে শক্তিস্তর চিত্রের মাধ্যমে এই ক্ষরণের প্রকৃতি নির্দেশ করা হয়েছে। ক্ষরণ ঘটে নিম্নলিখিত দুটি উপায়ে

$$ {}_{48}Cd^{107} \rightarrow {}_{47}Ag^{107} + e^{+} + \nu $$

অথবা $$ {}_{48}Cd^{107} + e^{-} \rightarrow {}_{47}Ag^{107} + \nu $$

এই ক্ষরণের অর্ধজীবনকাল 6·7 ঘণ্টা। 9·8 চিত্রে নির্দেশিত অনুপাতগুলি থেকে বোঝা যায় যে পজিট্রন ক্ষরণের হার ইলেকট্রন আহরণের তুলনায় এক্ষেত্রে নগণ্য। ক্ষরণোত্তর সন্তান কেন্দ্রীনের কয়েকটি শক্তিস্তর এই ক্ষরণের ভিতর লক্ষ্য করা সম্ভব, এগুলি চিত্রে দেখান হয়েছে। Be^7 আইসোটোপের ক্ষয়ে শুধু ইলেকট্রন আহরণই ঘটা সম্ভব কারণ Be^7 ও Li^7 পরমাণুদ্বয়ের ভরের পার্থক্য 0·862 এমইভি।

ইলেকট্রন আহরণে ইলেকট্রনটি সাধারণতঃ K সেল থেকেই আহরিত হয় একথা আগেই বলা হয়েছে, এর ফলে ঐ সেলে শূন্যতা সৃষ্টি হয় এবং অন্যান্য সেল থেকে ইলেকট্রনের পরাবর্তন ঘটায় ফলে K-আহরণোত্তর পরমাণু থেকে রঞ্জনরশ্মি বিকিরণ ঘটতে থাকবে। ইলেকট্রন আহরণের সাথে সাথে এই ধরণের রঞ্জনরশ্মি বিকিরণ সবসময়ই লক্ষিত হয়। এছাড়া ওজে প্রক্রিয়াও ঘটতে পারে। নির্গত নিউট্রিনোটিকে সরাসরি পর্য্যবেক্ষণ করা সম্ভব নয়, ইলেকট্রন আহরণের ফলে উদ্ভূত কেন্দ্রীনের পশ্চাদ্মুখী ভরবেগ এবং সৃষ্ট রঞ্জনরশ্মি আলোককণা লক্ষ্য ক'রে আহরণ প্রক্রিয়া বিশ্লেষণ করা হয়।

এরকম আরও একটি উদাহরণ হ'ল ${}_{23}V^{49}$ আইসোটোপের ইলেকট্রন আহরণ, এই আইসোটোপটি ${}_{22}Ti^{48}$ $({}_{1}H^{2}, n)_{23}V^{49}$ বিক্রিয়ার প্রস্তুত করা যায়। এর অর্দ্ধজীবনকাল 330 দিন এবং এটি ইলেকট্রন আহরণ প্রক্রিয়ার দ্বারা ক্ষরিত হয়

$${}_{23}V^{49} + e^{-} \rightarrow {}_{22}Ti^{49} + \nu$$

বিশুদ্ধ তেজস্ক্রিয় ভ্যানাডিয়াম আইসোটোপ প্রস্তুত ক'রে তাথেকে Ti^{49} আইসোটোপের K_{a} এবং অন্যান্য রঞ্জনরশ্মি রেখাগুলি নির্গত হতে দেখা গেছে, আর অন্য কোনরকম তেজস্ক্রিয় বিকিরণ এর ভিতর দেখা যায় না। সুতরাং এই পর্য্যবেক্ষণ থেকে সিদ্ধান্ত করা যায় যে এক্ষেত্রে একমাত্র ইলেকট্রন আহরণ প্রক্রিয়ার দ্বারাই ক্ষরণ সম্ভব হচ্ছে। তাছাড়া এভাবে দৃষ্ট রঞ্জন-রশ্মির তীব্রতা সূচক অপেক্ষকের আকারে হ্রাস পেতে থাকে, অর্থাৎ 330 দিন পর তীব্রতা অর্দ্ধেকে পরিণত হয়। যেহেতু এই ক্ষরণে শুধু ক্ষরণোত্তর আইসোটোপের রঞ্জনরশ্মিগুলি উৎপন্ন হতে দেখা যায়, এথেকে বোঝা যায় যে ${}_{22}Ti^{49}$ এর ভূমিস্তরে উপনীত থাকে।

বিটাকণার শোষণ

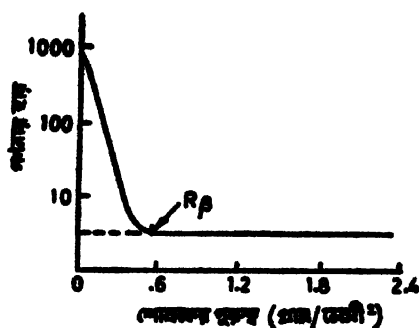
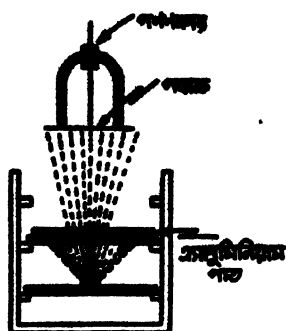
পদার্থের ভিতর বিটাকণাগুলি কিভাবে শোষিত হয় তা লক্ষ্য ক'রে অনেক-ক্ষেত্রে এদের শক্তি নিরূপণ করা যায়, ঠিক যেমন করা যায় আলফাকণাদের ক্ষেত্রে। তবে বিটাকণাগুলি আলফাকণাদের তুলনায় অনেক বেশী অন্তর্গমনশীল এবং এদের শোষণ পরিমাপনের পদ্ধতিও স্বতন্ত্র। একটি আলফাকণা যার শক্তি 3 এমইভি, মানক (standard) চাপ ও তাপমাত্রার বাতাসের ভিতর এর দৌড়দূরত্ব হবে প্রায় 2·8 সেমি, সে-তুলনায় ঐ একই শক্তির বিটাকণা মানক বাতাসে প্রায় 1000 সেমি ভ্রমণ করে। এই কারণে বিটাকণার শোষণ নির্দ্ধারণের জন্য বাতাসের মাধ্যম ব্যবহার বিশেষ যুক্তিযুক্ত

কম এবং এদের জন্য সাধারণতঃ কঠিন পদার্থের শোষক ব্যবহৃত হয়। সচরাচর এ্যালুমিনিয়ামের পাত শোষক হিসাবে ব্যবহৃত হয়, অন্যের ব্যবহারও প্রচলিত।

শোষণের পরীক্ষায় শোষক পাতগুলি তেজস্ক্রিয়াশীল উৎস এবং অতি পাতলা জানালা বিশিষ্ট একটি গাইগার মূলার গণনকারের অন্তর্বর্তী স্থানে রাখা হয় এবং গণনার হার শোষকের বেধের অপেক্ষক হিসাবে মাপা হয়। ৯·৯ চিত্রে এরকম একটি পরীক্ষার আয়োজনের ছক দেখান হয়েছে। সন্তত শক্তির (continuous energy) বর্ণালী সৃষ্টিকারী বিটাকণাগুলির শোষণের প্রকৃতি পাশের চিত্রটিতে দেখা যাচ্ছে, গণনার হার এখানে লগ মাপনীতে নির্দেশ করা হয়েছে এবং তা শোষকের যথেষ্ট পরিমাণ পুরুত্ব পর্যন্ত সরলরৈখিক* অনুপাতে হ্রাস পেতে দেখা যায়। যেহেতু লগ মাপনীতে লেখটি অঙ্কিত করায় একটি সরলরেখা পাওয়া যাচ্ছে, এথেকে বোঝা যায় যে শোষকের অভ্যন্তরে বিটাকণার তীব্রতা দূরত্বের সাথে সাথে সূচক অপেক্ষকের সূত্রানুসারে হ্রাস পায়, অর্থাৎ শোষণের প্রকৃতি নিম্নলিখিত সূত্রের দ্বারা প্রকাশ করা সম্ভব

$$A(x) = A_0 e^{-\mu x} \qquad \cdots \qquad ৯·১৫$$

এখানে A_0 শোষণবিহীন অবস্থায় গণনার হার এবং $A(x)$ শোষকের অভ্যন্তরে x দূরত্ব অতিক্রম করার পর যে গণনার হার বজায় থাকে তার পরিমাণ। μ-কে বলা হয় শোষণের সহগ, স্পষ্টতই শোষণের এই প্রকৃতি পূর্বোক্ত রঞ্জনরশ্মি শোষণের অনুরূপ। পরীক্ষায় দেখা যায় যে গণনার হার কখনই একেবারে লোপ পায় না, এমনকি যখন শোষকের পুরুত্ব অত্যধিক বেশী হয় তখনও নয়। এই অবস্থায় অবশ্য গণনার পরিমাণ মোটামুটি ধ্রুব থাকে এবং একে বলা হয় ধ্রুব পশ্চাদবস্থা। এইরকম পশ্চাদবস্থা নানারকম বহিরাগত বিকিরণের প্রভাবে সৃষ্টি হয় এবং পরীক্ষমাণ বিটা কণার সঙ্গে এর কোন সম্পর্ক নেই। একেবারে শেষের দিকে এসে শোষণের লেখটি সরলরেখা থেকে বিচ্যুত হয় এবং যে বিন্দুতে এটি পশ্চাদবস্থার সঙ্গে মিলিত হয় তাকে বলা হয় বিটাকণার দৌড়দূরত্ব। ৯·৯ চিত্রের লেখটির সূচক অপেক্ষকের আকৃতি অবশ্য কিছুটা আকস্মিক, কারণ বিটাকণাগুলির শক্তি সন্ততভাবে বিস্তারিত এবং এদের শোষণ হ'ল বিভিন্ন কণাগুলির উপর শোষকের প্রভাবের সম্মিলিত ফল। দৌড়দূরত্ব R_β হ'ল সর্বাধিক শক্তিসম্পন্ন বিটাকণাগুলি শোষকের মধ্যে যতটা দূরত্ব অতিক্রম করে তার পরিমাণ এবং একমাত্র তা বিটারশ্মি বর্ণালীতে চরম

...মান শক্তিকে নির্দেশ করে। অনন্যশক্তির বিটাকণাগুলি, যেমন যেগুলি ...নিহিত পটপরিবর্তনের দ্বারা উৎপন্ন হয়, সেগুলির শোষণও 9·9 লেখচিত্রের অনুরূপ, তবে দলচ্যুতির জন্য একেবারে শেষপ্রান্তে এসে লেখটি সরলরেখা থেকে বিচ্যুত হয়।

চিত্র 9·9 : (a) বিটাকণার শোষণ পর্যবেক্ষণের জন্য পরীক্ষার আয়োজন ;
(b) শোষণের পরীক্ষায় প্রাপ্ত শোষকের চরম পুরুত্ব।

বিটাকণাদের পদার্থের ভিতর শক্তিক্ষয়ের চিত্রটি আলফাকণাদের শক্তিক্ষয়ের তুলনায় অনেক জটিল, এই পার্থক্য হয় বিটাকণাগুলির অত্যন্ত ক্ষুদ্র ভর এবং অধিকতর গতিবেগের জন্য। একটি বিটাকণা এর শক্তির এক বিরাট অংশ কোন একটি আণবিক ইলেকট্রনের সঙ্গে সংঘাতে ক্ষয় ক'রে ফেলতে পারে। এই কারণে দলচ্যুতির পরিমাণ আলফাকণাদের তুলনায় অনেক বেশী। বিচ্ছুরণের ফলে অপেক্ষাকৃত সহজেই এদের ভরবেগ যথেষ্ট পরিমাণে পরিবর্তিত হয়ে থাকে, এজন্য এদের গতিপথের চিত্র এক একটি তরঙ্গিত রেখার মত দেখায়। দলচ্যুতি এবং বিচ্ছুরণের জন্য একটি মাধ্যমের মধ্যে একই শক্তিসম্পন্ন বিভিন্ন বিটাকণা বিভিন্ন দূরত্ব অতিক্রম করে এবং আলফাকণার ন্যায় এদের ক্ষেত্রে দৌড়দূরত্বের সংজ্ঞা অতটা সুস্পষ্টভাবে দেওয়া যায় না। সর্বশেষ অধ্যায়ে পুনরায় শক্তিশালী ইলেকট্রনদের শক্তিক্ষয়ের প্রকৃতি সম্বন্ধে কিছু আলোচনা করা হবে।

দ্বিবিধ ফোকাস সমন্বিত বিটারশ্মি বর্ণালী মাপনী (Double focussing beta ray spectrometer)

ষষ্ঠ অধ্যায়ে আমরা ইলেকট্রনের শক্তি নির্ণয়ের জন্য ব্যবহৃত একটি যন্ত্রের বর্ণনা দিয়েছিলাম, যেখানে ইলেকট্রনগুলির গতিপথ একটি নির্দিষ্ট সমতলের

উপর অবস্থান করে। যে ইলেকট্রনগুলির গতিপথ ঐ সমতলের সঙ্গে কোন কোণে নত থাকে সেগুলি স্পাইর্যাল পথে অগ্রসর হয়ে মূল ফোকাস সমতল থেকে সম্পূর্ণ বিচ্যুত হয়ে যায়, ঐসব ইলেকট্রনগুলিকে ফোকাস করার আয়োজন ঐ যন্ত্রে নেই। সিগবাহন, সাভার্যোল্ম্ এবং হেডম্যান একটি উন্নতধরণের যন্ত্র নির্মাণ করেন যার দ্বারা ঐ ইলেকট্রনগুলিকেও ফোকাস করা সম্ভব হয়। এদের উন্নতিবিধানের মূল নীতি হ'ল এমন একটি চৌম্বকক্ষেত্র সৃষ্টি করা যার তীব্রতা গতিপথের ব্যাসার্দ্ধ বরাবর পরিবর্তিত হয়। এই ধরণের চৌম্বক-ক্ষেত্রের ভিতর যেসমস্ত ইলেকট্রনগুলির গতিপথ একটি ছোট শীর্ষকোণ বিশিষ্ট শঙ্কুর আকারে কেন্দ্রীয় রশ্মিটির চতুর্দিক থেকে অগ্রসর হয় সেগুলি সমস্তই একটি নির্দিষ্ট বিন্দুতে ফোকাস করা যায় এবং এর ফলে ফোকাস বিন্দুতে ইলেকট্রনের তীব্রতা অনেক বেশী হয়।

অসমমাত্র চৌম্বকক্ষেত্র যা এই যন্ত্রের আয়োজনে ব্যবহৃত হয় তা একটি নির্দিষ্ট অক্ষের, যেমন z-অক্ষের, চতুর্দিকে প্রতিসম কিন্তু z-অক্ষের সঙ্গে লম্ব ব্যাসার্দ্ধ r-এর সাথে সাথে r^{-n} সূত্রানুযায়ী হ্রাস পায়। 9·10 চিত্রে z অক্ষটি কাগজের সমতলের সঙ্গে লম্বভাবে অবস্থান করে। z অক্ষের সঙ্গে লম্বভাবে অবস্থিত একটি সমতলে যেকোন r_0 ব্যাসার্দ্ধ বিশিষ্ট একটি বৃত্তের পরিধির উপর সর্বত্র চৌম্বকক্ষেত্রের তীব্রতা সমান, ধরা যাক এই ব্যাসার্দ্ধের বৃদ্ধির সাথে সাথে তীব্রতা r^{-n} সূত্রানুযায়ী হ্রাস পায়; সুতরাং r_0 দূরত্বে তীব্রতার পরিমাণ B_0 এর জন্য আমরা লিখতে পারি

$$B_0 = Cr_0^{-n} \qquad \cdots \qquad 9·16$$

এখানে C একটি ধ্রুবক, r দূরত্বে এই তীব্রতার পরিমাণ হবে $B = Cr^{-n}$

সুতরাং $$B = B_0\left(\frac{r_0}{r}\right)^n \qquad \cdots \qquad 9·17$$

এখানে n একটি ধ্রুবক, $0<n<1$, ইলেকট্রনের উৎসটি $z=0$ সমতলে S বিন্দুতে অবস্থিত। এখান থেকে যে ইলেকট্রনগুলি OS-এর সাথে লম্বভাবে নির্গত হয়ে আসে সেগুলি এই সমতলের উপর r_0 ব্যাসার্দ্ধ বিশিষ্ট একটি বৃত্তে আবর্তিত হবে, এই বৃত্তটিকে আমরা কেন্দ্রীয় বৃত্ত আখ্যা দিতে পারি। এই কেন্দ্রীয় বৃত্তে আবর্তনকালীন ইলেকট্রনটির কৌণিক গতিবেগ হবে ω_0 এবং এর পরিমাণ

$$\omega_0 = v/r_0 = B_0 e/mc \qquad \cdots \qquad 9·18$$

এখানে m ইলেকট্রনটির আপেক্ষিকতামূলক ভর (relativistic mass)।

এখন ধরা যাক একটি ইলেকট্রন যার প্রাথমিক দিক মানক বৃত্তের স্পর্শকের সঙ্গে কোন দিকে স্বল্প α কোণে নত আছে। দেখান যায় যে উপরোক্ত চৌম্বক-ক্ষেত্রের আয়োজনের মধ্যে এই ইলেকট্রনটি মানক বৃত্তের পরিপ্রেক্ষিতে r এবং z দিক বরাবর স্পন্দিত হতে থাকবে। আরও দেখান যায় যে এই দুই স্পন্দনের স্পন্দনাঙ্ক হবে

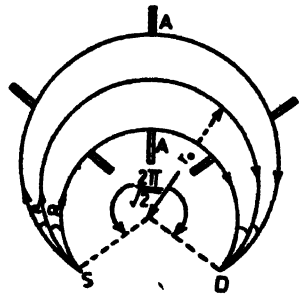
$$\omega_r = (1-n)^{\frac{1}{2}}\omega_0 \qquad \cdots \qquad 9{\cdot}19$$
$$\omega_z = n^{\frac{1}{2}}\omega_0$$

ইলেকট্রনগুলির ফোকাস হবে তখনই যখন এরা এদের z-স্পন্দন এবং r-স্পন্দনের কোন এক দশায় পুনরায় একই বিন্দুতে ফিরে আসবে। যে সময়ে ইলেকট্রনটি এর r-স্পন্দনের অর্দ্ধভাগ শেষ করে ঠিক সেই সময়ের মধ্যেই যদি z-স্পন্দনের অর্দ্ধভাগও শেষ করে তবে ঐ অর্দ্ধস্পন্দনের সময়ের পর পুনরায় এটি মানক বৃত্তটির উপর ফিরে আসবে; অর্থাৎ এর অর্থ হ'ল যে ফোকাসের জন্য ω_r এবং ω_z-কে পরস্পর সমান ধরতে হবে। যদি তাই ধরা যায় তবে আমরা পাই

$$n = \tfrac{1}{2} \text{ এবং } \omega_z = \omega_r = \omega_0/\sqrt{2} \qquad \cdots \qquad 9{\cdot}20$$

এই সর্ত্তটি যেকোন দিকে নির্গমনের জন্যই ক্রিয়াশীল থাকে যদি অবশ্য নির্গমন কোণটি (মানক বৃত্তের স্পর্শকের সঙ্গে) খুব বড় না হয়।

চিত্র 9·10
সিগবান্ এবং সাভার্থোল্ম্-এর বিটারশ্মি বর্ণালী মাপনীর ক্রিয়াপদ্ধতি।

9·20 সর্ত্তটি থেকে আমরা দেখি যে 180°-তে কোন ফোকাস হয় না কিন্তু হয় $2\pi/\sqrt{2} = 254^\circ\ 33'$ ডিগ্রিতে, এবং ইলেকট্রন নির্দ্দেশকটিকে ঠিক এই কৌণিক অবস্থানেই রাখতে হবে। ষষ্ঠ অধ্যায়ে বর্ণিত যন্ত্রটির তুলনায় এই যন্ত্রের আয়োজনের বিশ্লেষণ ক্ষমতা প্রায় তিনগুণ বেশী। এই আয়োজনের আরও একটি সুবিধা হ'ল এই যে, এখানে অনেক বেশী বিস্তৃত উৎস ব্যবহার করা চলে এবং এজন্য অপেক্ষাকৃত ক্ষীণ উৎসের পক্ষে এটি বিশেষ উপযোগী।

গামা ক্ষরণ (Gamma Decay)

আলফা বা বিটা ক্ষরণের ফলে যে উত্তেজিত সন্তান কেন্দ্রীনের সৃষ্টি হয় সেগুলি সাধারণতঃ গামারশ্মি বিকিরণ ক'রে উত্তেজিত স্তর থেকে ভূমিস্তরে

নেমে যায়। 9·5 ও 9·8 চিত্র থেকে কেন্দ্রীনের গামা ক্ষরণের পদ্ধতি বোঝা যায়। আলফা বা বিটা কণাগুলির তুলনায় গামারশ্মির অন্তর্গমন ক্ষমতা অনেক বেশী তা আগেই বলা হয়েছে। একটি 4 এমইভি শক্তির আলফা-কণা মাত্র কয়েক মিলিমিটার পুরু জলের আস্তরণের মধ্যেই থেমে যাবে, 2 সেণ্টিমিটার পুরু জলের স্তর 4 এমইভি ইলেকট্রনকে থামিয়ে দিতে সক্ষম। কিন্তু 4 এমইভি শক্তির গামারশ্মি জলের ভিতর 20 সেণ্টিমিটার ভ্রমণ করলেও এর তীব্রতা মাত্র অর্দ্ধেক হ্রাস পায়, 70 সেণ্টিমিটার জলের ভিতর দিয়ে ভ্রমণ করার পরও এর তীব্রতার শতকরা দশ ভাগ বজায় থাকে। পদার্থের উপর গামারশ্মির পরিক্রিয়া রঞ্জনরশ্মির অনুরূপ। অধিক পারমাণবিক সংখ্যাবিশিষ্ট মৌলগুলির গামাশোষণের ক্ষমতা অপেক্ষাকৃত অনেক বেশী এজন্য সীসা গামারশ্মি শোষক হিসাবে খুব বেশী ব্যবহৃত হয়। বিটা ও আলফা কণার ক্ষেত্রে শোষকের ভিতর এদের পথদৈর্ঘ্য মোটামুটি নির্দিষ্টভাবে নির্দেশ করা যায় এবং অবস্রব অথবা মেঘকক্ষের ভিতর সমগ্র পথদৈর্ঘ্যের ছবিও তুলতে পারা যায়, কিন্তু গামারশ্মির ক্ষেত্রে সেরূপ কোন নির্দিষ্ট পথদৈর্ঘ্য নির্দেশ করা যায় না। অন্তর্গমনকালীন গামারশ্মির তীব্রতা ক্রমশঃ হ্রাস পেতে থাকে কিন্তু সামান্য পরিমাণের তীব্রতা বহুদূর পর্য্যন্ত লক্ষ্য করা যায়। গামারশ্মির শোষণের সূত্রটি রঞ্জনরশ্মির ক্ষেত্রে প্রদত্ত শোষণের সূত্রের সঙ্গে অভিন্ন

$$I = I_0 e^{-\mu x} \qquad \cdots \qquad 6·7$$

I_0 ও I যথাক্রমে প্রারম্ভিক ও শোষকের ভিতর x-দূরত্বে গামারশ্মির তীব্রতা, μ-কে বলা হয় শোষণের সহগ। গামারশ্মি ও রঞ্জনরশ্মির মধ্যে আসলে পার্থক্য কিছুই নেই কারণ উভয়ই হ'ল অত্যন্ত ক্ষুদ্র তরঙ্গদৈর্ঘ্য বিশিষ্ট বিদ্যুৎ-চুম্বকীয় বিকিরণ। সাধারণতঃ প্রকৃতিজাত (যেমন কেন্দ্রীনের ক্ষরণ) রশ্মি-গুলিকে গামারশ্মি এবং কৃত্রিম উপায়ে উৎপন্ন রশ্মিগুলিকে রঞ্জনরশ্মি আখ্যা দেওয়া হয়ে থাকে। বর্ত্তমানে কৃত্রিম উপায়ে প্রকৃতিজাত গামারশ্মির তুলনায় অনেক বেশী শক্তিশালী রঞ্জনরশ্মি উৎপন্ন করা যায়।

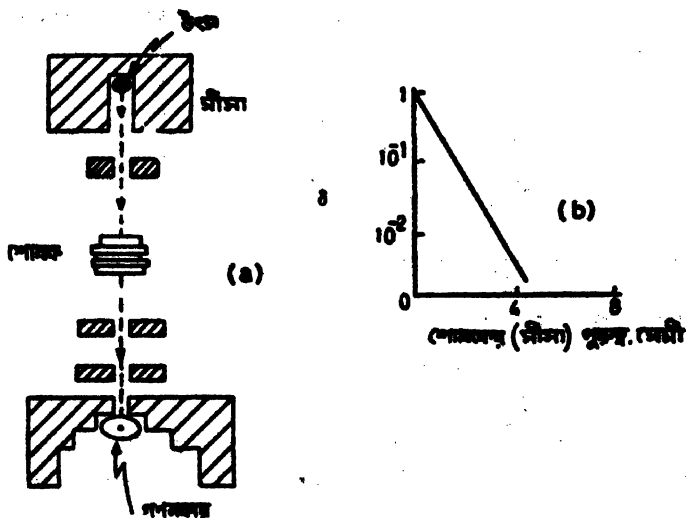
6·7 সমীকরণে μ হ'ল শোষকের শোষণক্ষমতা নির্দেশক একটি ধ্রুবক, $\frac{1}{\mu}$ দূরত্বে গামারশ্মির তীব্রতা এর প্রারম্ভিক তীব্রতার $\frac{1}{e}$ তম অংশে পরিণত হয়। অবশ্য উপলিখিত 6·7 সমীকরণটি কি কি বিশেষ অবস্থার মধ্যে পালিত হয় তা একটু আলোচনা করা দরকার, এক্ষেত্রে যে কতগুলি সর্ত পালিত হওয়া প্রয়োজন তা হ'ল এই

(1) গামারশ্মির রশ্মিটি সমান শক্তিবিশিষ্ট;

(২) ধারাটি সরলবিন্যস্ত অর্থাৎ এর কঠিন কোণ (solid angle) খুবই নগণ্য ;

(৩) শোষকের পুরুত্ব যথেষ্ট কম।

গামারশ্মি শোষণের পরীক্ষার একটি আয়োজন 9·11 চিত্রে দেখান হয়েছে, এই আয়োজনের সাহায্যে একটি সরু সরলবিন্যস্ত ধারা সৃষ্টি করা যায় যার উপর শোষণের পরীক্ষা করা চলে, একে বলা হয় "উত্তম জ্যামিতি" আয়োজন। 9·11 চিত্রে ভারী সীসার ব্লকগুলির মাঝে একটি সরু পথের অস্তিত্ব দেখা যাচ্ছে, যে গণনকারটির দ্বারা গামারশ্মির তীব্রতা মাপা হবে সেটিও পুরু সীসার

চিত্র 9·11

গামারশ্মির শোষণ পর্য্যবেক্ষণের জন্য পরীক্ষার আয়োজন (a) এবং পরীক্ষালব্ধ লেখ (b)

$$\text{এখানে } \delta = \frac{\text{শোষণান্তর গামারশ্মির তীব্রতা}}{\text{প্রাথমিক তীব্রতা}}$$

পাতের দ্বারা আবৃত থাকে যাতে বহিঃস্থ বিচ্ছুরিত ইলেকট্রন বা আলোককণাগুলি এর ভিতর প্রবেশ করতে না পারে। শোষকের মধ্য দিয়ে যাবার সময় যে তীব্রতা হ্রাস পায় তার কারণ শোষকের পরমাণুগুলির দ্বারা শোষণ অথবা বিচ্ছুরণ। পরমাণুর ভিতর শোষিত হলে গামা আলোককণাটি ধ্বংসপ্রাপ্ত হয়, এর ফলে সাধারণতঃ আহিত কণা উৎপন্ন হয় কিন্তু উত্তম জ্যামিতিসম্পন্ন আয়োজনে ঐগুলির গণনকারের ভিতর প্রবেশ করার সম্ভাব্যতা খুব কম। বিচ্ছুরণের ফলেও গামারশ্মির গতিমুখ পরিবর্তিত হয়ে যাওয়াতে

তা আর গণনকারের ভিতর পৌঁছুতে পারে না। 9·11(b) চিত্রে Na^{24} তেজস্ক্রিয় কেন্দ্রীনজাত 2·76 এমইভি গামারশ্মির সীসার ভিতর শোষণের প্রকৃতি দেখান হয়েছে, শোষণোত্তর তীব্রতা এবং শোষকবিহীন অবস্থায় তীব্রতার অনুপাত শোষকের (সীসা) পুরুত্বের অপেক্ষক হিসাবে লগ মাপনীতে আঁকা হয়েছে। লেখটি একটি সরলরেখা যা 6·7 সমীকরণের সঙ্গে সম্পূর্ণ সামঞ্জস্যপূর্ণ। সরলরেখাটির আপতন দেখে আমরা শোষণের সহগ μ নির্ণয় করতে পারি, এর পরিমাণ হ'ল μ সেমি$^{-1} = 0{\cdot}477$।

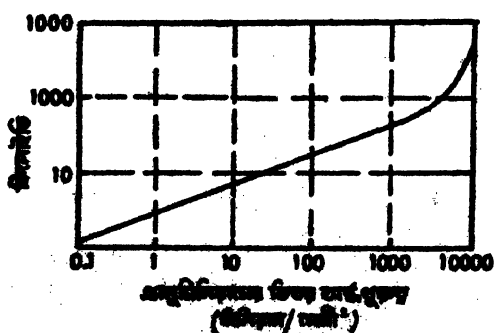
গামারশ্মির শোষণের পরিমাণ আরও একভাবে প্রকাশ করা যায়, একে বলা হয় অর্দ্ধপুরুত্ব অর্থাৎ শোষকের সেই পরিমাণ পুরুত্ব যা গামারশ্মির তীব্রতাকে অর্দ্ধেকে পরিণত ক'রে ফেলতে পারে। 6·7 সমীকরণকে নিম্নলিখিতভাবে প্রকাশ করা যায়

$$\log \frac{I}{I_0} = 0{\cdot}4343\mu x$$

যদি $I/I_0 = \frac{1}{2}$ তাহলে $\log \frac{1}{2} = -0{\cdot}4343\mu x_{\frac{1}{2}}$

এবং $\mu = 0{\cdot}693/x_{\frac{1}{2}}$, এখানে $x_{\frac{1}{2}}$ হ'ল অর্দ্ধপুরুত্ব। 9·11(b) চিত্রের লেখটি থেকে অর্দ্ধপুরুত্বের পরিমাণ হয়

$$x_{\frac{1}{2}} = 0{\cdot}693/0{\cdot}477 = 1{\cdot}45 \text{ সেমি}$$

কোন নির্দিষ্ট শোষকের ভিতর বিভিন্ন গামারশ্মির অর্দ্ধপুরুত্বের পরিমাণ থেকে ঐসব গামারশ্মির শক্তি সম্বন্ধে অবহিত হওয়া যায়। অপেক্ষাকৃত স্বল্প শক্তির

চিত্র 9·12

অ্যালুমিনিয়ামের ভিতর অর্দ্ধপুরুত্ব (মিলিগ্রাম/সেমি²) ও আলোককণার শক্তির মধ্যে পরীক্ষালব্ধ সম্বন্ধ।

[Glendenin, L. E., Nucleonics 2, No. 1, 12 (1948)]

গামারশ্মির জন্য অর্ধশূন্যস্থ বনাম শক্তির একটি পরীক্ষালব্ধ লেখ 9·12 চিত্রে দেখান হয়েছে, এক্ষেত্রে শোষক হ'ল এ্যালুমিনিয়াম, অধিকতর গামারশ্মির শক্তিতে শোষক হিসাবে সীসা ব্যবহৃত হয়।

ডুমণ্ডের (Dumond) গামারশ্মি বর্ণালী মাপনী

গামারশ্মির শক্তি নির্ণয়ের অনেক পদ্ধতি আছে। গামারশ্মিগুলি যেহেতু বিদ্যুৎচুম্বকীয় তরঙ্গবিশেষ, সবচেয়ে সরল পদ্ধতি হ'ল স্ফটিক ব্যতিচারের দ্বারা এদের তরঙ্গদৈর্ঘ্য নির্দ্ধারণ ক'রে তাথেকে শক্তি নির্ণয় করা। গামারশ্মির শক্তি নির্দ্ধারণের জন্য একটি বাঁকান স্ফটিকের বর্ণালী মাপনীর বিবরণ দিয়েছেন বিজ্ঞানী ডুমণ্ড, এর কার্য্যপদ্ধতি 9·13 চিত্রের সাহায্যে বোঝান হয়েছে। একটি কোয়ার্টজ স্ফটিক C ঈষৎ বাঁকান অবস্থায় এমনভাবে আটকে রাখা হয়েছে যে এর ব্যতিচারী সমতলগুলি, এদের বর্দ্ধিত করলে, B বিন্দু দিয়ে অতিক্রমকারী কাগজের সমতলের উপর লম্ব একটি সরলরেখায় এসে মিলিত হয়। স্ফটিকটি বাঁকান অবস্থায় VBRC বৃত্তের একটি চাপ সৃষ্টি করে, এই বৃত্তটিকে বলা হয় ফোকাস বৃত্ত, স্ফটিকটির বক্রতার ব্যাসার্দ্ধ এই বৃত্তের ব্যাসের সমান। গামারশ্মির উৎসটিও ফোকাস বৃত্তের পরিধির উপর রাখা হয়, ধরা যাক উৎসবিন্দুটি হ'ল R এবং এথেকে উদ্গত রশ্মির স্ফটিকের ভিতর ব্যতিচার ঘটবে এবং যদি ব্র্যাগ সর্তটি প্রতিপালিত হয় তবে ব্যতিচারোত্তর রশ্মি D গণনকারের ভিতর প্রবেশ করবে এমনভাবে যেন এগুলি অলীক উৎস V থেকে এসেছে। দেখান যায় যে যদি R ফোকাস বৃত্তের পরিধির উপর থাকে এবং যদি ব্র্যাগ সর্ত প্রতিপালিত হয় তবে V ফোকাস বৃত্তের পরিধির উপর থাকবে, এক্ষেত্রে ব্র্যাগ প্রতিবিম্বন কোণ হয় θ। প্রতিটি বিভিন্ন তরঙ্গ-দৈর্ঘ্যের জন্যই পরিধির উপর এক একটি বিশেষ বিন্দু আছে যেখানে উৎসটি রাখলে এইরকম একটি ব্যতিচারী ধারা উৎপন্ন হবে। A হ'ল কতগুলি সমান্তরাল সীসার পাতের দ্বারা তৈরী একটি জালি, ব্যতিচারোত্তর রশ্মিকে এর দ্বারা সরলবিন্যস্ত (collimated) করা যায় অর্থাৎ কোন একটি বিশেষ অলীক উৎস V থেকে আগত রশ্মিই শুধু এর ভিতর দিয়ে গণনকার D-এর ভিতর প্রবেশ করতে পারে। গণনকারটির গণনার হার বৃত্তের পরিধির উপর উৎসের স্থানাঙ্কবিন্দুর অপেক্ষক হিসাবে লক্ষ্য করলে দেখা যায় যে, এই হার চরম অবস্থায় নীত হয় তখনই যখন ব্র্যাগ সর্ত পালিত হয় এবং একটি ব্যতিচারোত্তর ধারা উৎপন্ন হয়, এবং উৎসের অবস্থান থেকে তখন গামারশ্মির তরঙ্গদৈর্ঘ্য নির্ণীত হতে পারে। এই পদ্ধতিতে যে শক্তি নির্দ্ধারিত হয় তা অত্যন্ত

নির্ভুল, যেমন Au^{198} আইসোটোপের β-ক্ষয়োত্তর যে গামারশ্মি উৎপন্ন হয় এর শক্তির নির্ণীত পরিমাণ হ'ল $411{\cdot}770 \pm 0{\cdot}036$ কিলোইভি এবং ঐ একই প্রকারের নির্ভুলতা আরও বহু গামারশ্মির ক্ষেত্রে পাওয়া সম্ভব হয়েছে।

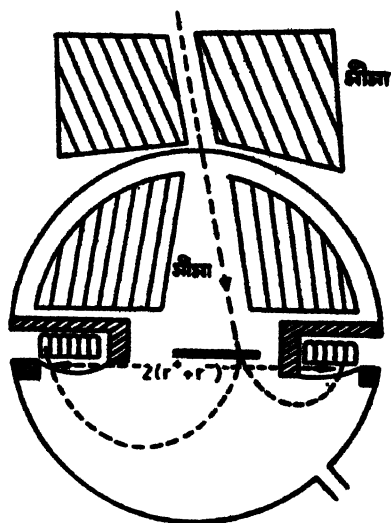
চিত্র 9·13

ডুমণ্ডের বাঁকান স্ফটিক গামারশ্মি বর্ণালী মাপনী।

এই পদ্ধতির মূল দুর্ব্বলতা হ'ল এই যে, অধিকতর শক্তিতে এর প্রয়োগ ক্রমশঃ কঠিনতর হতে থাকে। এছাড়া এই ধরণের পরিমাপের জন্য প্রয়োজন হয় এমন উৎস যাদের গামারশ্মি তেজাস্ক্রিয়তা খুবই বেশী যা সবসময় সহজলভ্য নয়। ডুমণ্ডের গামারশ্মি বর্ণালী মাপনী জোড়াবিনাশ থেকে উদ্গত গামারশ্মির শক্তি নির্দ্ধারণের ক্ষেত্রে অত্যন্ত সার্থকভাবে ব্যবহৃত হয়েছে। Cu^{64} থেকে নির্গত পজিট্রনের বিনাশ থেকে প্রাপ্ত একটি গামারশ্মির শক্তি এই পদ্ধতিতে নির্ণয় করা হয়েছে এবং এর যে পরিমাণ পাওয়া যায় তা হ'ল $510{\cdot}941 \pm 0{\cdot}067$ কিলোইভি। অন্যান্য পরীক্ষা থেকে ইলেকট্রনের যে সূক্ষ্মতম ভর নির্ণীত হয়েছে তার পরিমাণ $510{\cdot}969 \pm 0{\cdot}015$ কিলোইভি, অর্থাৎ এই পরিমাণ উপরোক্ত জোড়াবিনাশ প্রক্রিয়া থেকে প্রাপ্ত পরিমাণের সঙ্গে খুবই সামঞ্জস্যপূর্ণ। ইলেকট্রন ও পজিট্রনের মধ্যে সম্ভাব্য ভরের পার্থক্যের পরিমাণও এই দুই রাশির মাধ্যমে নির্দ্ধারণ করা যায় এবং এই পরীক্ষায় এর পরিমাণ হ'ল 10^4 ভাগের মধ্যে এক ভাগ মাত্র।

জোড়াসৃষ্টি প্রক্রিয়া চালিত বর্ণালী মাপনী (Pair creation spectrometer)

অধিকতর শক্তিসম্পন্ন ($\gtrsim 3$ এমইভি) গামারশ্মি পদার্থের ভিতর ইলেকট্রন-পজিট্রন জোড়া উৎপন্ন করে এবং এই প্রক্রিয়ার সাহায্য নিয়েও

গামারশ্মির শক্তি নির্ণয় করা যায়। অধিকতর শক্তিতে জোড়াসৃষ্টির সম্ভাবনা আলোক-বিদ্যুৎপ্রক্রিয়া কিংবা কম্পটন প্রক্রিয়ার তুলনায় দ্রুত বৃদ্ধি পেতে থাকে। জোড়াসৃষ্টি প্রক্রিয়ার সাহায্য নিয়ে কিভাবে গামারশ্মির শক্তি নির্ণয় করা যায় তা 9·14 চিত্রের আয়োজন থেকে বোঝা যাবে। একটি সরলাবিন্যস্ত (collimated) গামারশ্মির ধারা কোন একটি বিকিরকের উপর প'ড়ে

চিত্র 9·14
জোড়াবিনাশ প্রক্রিয়া চালিত গামারশ্মি বর্ণালী মাপনী।

তাথেকে ইলেকট্রন-পজিট্রন জোড়া উৎপন্ন করে। একটি সমমাত্র চৌম্বকক্ষেত্র এই ইলেকট্রন-পজিট্রনদ্বয়কে বিপরীত দিকে বাঁকিয়ে ফেলে অবশেষে দু'দিকে রাখা দুই সারি গণনকারের ভিতর এনে ফেলে। ইলেকট্রন ও পজিট্রনকে একই মুহূর্তে লক্ষ্য করতে হবে, এজন্য তাৎক্ষণিকতা বর্তনীর (Coincidence circuit) সাহায্য নেওয়া হয়, এই বর্তনীর ভিতর একই সঙ্গে দুটি গণনকারের ভিতর দুটি ব্যত্যয় উৎপন্ন হলে তবেই সমগ্র ঘটনাটি গণ্য হয়। গাইগার মূলার গণনকার ব্যবহার করলে দুটি গণনকারের মধ্যে তাৎক্ষণিক গণনার বিশ্লিষ্টকরণ সময় 10^{-6} সেকেণ্ড পর্যন্ত করা যায়, আরও কম, অর্থাৎ প্রায় 10^{-8} সেকেণ্ড বিশ্লিষ্টকরণ সময় সৃষ্টি করা যায় যদি আয়নী-ভবন কক্ষ ব্যবহার করা যায়। ইলেকট্রন ও পজিট্রনের শক্তি এদের গতিপথের Br-এর পরিমাণ থেকে নির্ণয় করা সম্ভব এবং এদের শক্তিদ্বয়ের যোগফল হ'ল (এদের মোট স্থির শক্তি 1·02 এমইভি) নির্ণেয় গামারশ্মির শক্তি।

9·14 চিত্রে চৌম্বকক্ষেত্রটি কাগজের সমতলের সঙ্গে লম্বালম্বিভাবে আছে, গামারশ্মির গতিপথ দেখান হয়েছে ভগ্ন রেখার সাহায্যে; এটি একটি পাতলা ধাতুর পাতের উপর এসে পড়ে এবং তার ভিতর জোড়া উৎপন্ন করে। ধাতব বিকিরকের দু'পাশে দুই সারি গণনকার রয়েছে, এক সারির প্রতিটি গণনকার অপর সারির প্রতিটির সঙ্গে তাৎক্ষণিকতা আয়োজনে যুক্ত। ধরা যাক জোড়াসৃষ্টি প্রক্রিয়ায় উৎপন্ন কণাদ্বয়ের শক্তি এত বেশী যে এদের গতিশক্তির তুলনায় এদের স্থির শক্তির পরিমাণ নগণ্য, অধিক গামারশ্মির শক্তিতে এই সরলীকরণ মোটামুটি নির্ভুল। সুতরাং সেক্ষেত্রে আমরা লিখতে পারি

$$E_\gamma \simeq E_{e^+} + E_{e^-}$$

যেখানে E_{e^+}, E_{e^-} হ'ল যথাক্রমে পজিট্রন ও ইলেকট্রনের গতিশক্তি। যদি গতিশক্তির তুলনায় স্থির শক্তি নগণ্য হয় তবে আমরা লিখতে পারি

$$E^+ \simeq p^+c, \; E^- \simeq p^-c$$

এখানে p^+ ও p^- এদের ভরবেগ। চৌম্বকক্ষেত্রের ভিতর গতিপথের বক্রতা থেকেও এদের ভরবেগ নির্ণীত হয়

$$p = \frac{Bre}{c}$$

অধিকতর শক্তির ইলেকট্রন-পজিট্রন জোড়ার ক্ষেত্রে আমরা লিখতে পারি

$$E_\gamma = (p^+ + p^-)c = Be(r^+ + r^-) \qquad \cdots \quad 9·21$$

সুতরাং ধ্রুব চৌম্বকক্ষেত্রে নির্দিষ্ট শক্তির গামারশ্মির জন্য $(r^+ + r^-)$ অর্থাৎ ইলেকট্রন-পজিট্রনের গতিপথের বক্রতার ব্যাসার্ধের যোগফল একটি ধ্রুবক এবং 9·14 চিত্র থেকে বোঝা যায় যে এই যোগফল গণনকারদ্বয়ের মধ্যে দূরত্বের অর্ধেক। সুতরাং এথেকে বোঝা যায় যে বিকিরক ধাতুর পাতের কোন্ বিন্দু থেকে জোড়াটি উৎপন্ন হচ্ছে তার উপর শক্তির পরিমাণ নির্ভর করে না। চৌম্বকক্ষেত্রের তীব্রতা পরিবর্তিত ক'রে গণনার হার লক্ষ্য করা হয় এবং যে বিশেষ $B(r^+ + r^-)$ পরিমাণের জন্য গণনায় একটি তীক্ষ্ণ শিখর লক্ষিত হয় তাথেকে 9·22 সূত্রের সাহায্যে গামারশ্মির শক্তি নির্ধারিত হয়। স্পষ্টই খুব বেশী শক্তির গামারশ্মির জন্য এই পদ্ধতিটি বিশেষ উপযোগী।

অন্তঃস্থ পটপরিবর্তন (Internal conversion)

একটি কেন্দ্রীন বা আলফা বা বিটাক্ষয়োত্তর উত্তেজিত অবস্থায় আছে, সেটি এর উত্তেজনাশক্তি গামা ক্ষরণ বা অন্তঃস্থ পটপরিবর্তনের সাহায্যে বিকিরণ করতে পারে। অন্তঃস্থ পরিবর্তন ঘটলে সমস্ত উত্তেজনাশক্তি একটি কক্ষীয় ইলেকট্রনের ভিতর সঞ্চারিত হয় এবং এটি নির্গত হয়ে আসে। এর ফলে যে বিটারশ্মি বর্ণালীর ভিতর কতগুলি তীক্ষ্ণ শিখর সৃষ্টি হয় তা আগেই বলা হয়েছে। গামা ক্ষরণের দ্বারা উত্তেজনাশক্তি বিকিরণ করতে খুবই কম সময় দরকার হয়, সাধারণতঃ আলফা বা বিটা ক্ষরণের পর $10^{-10} \sim 10^{-11}$ সেকেণ্ডের মধ্যেই গামা ক্ষরণ ঘটে থাকে এজন্য গামা ক্ষরণের হার জনক-কেন্দ্রীনের তেজষ্ক্রিয়তার অর্দ্ধজীবনকাল নিয়েই হ্রাস পায় এবং এইসব কারণে গামারশ্মি বিকিরণ যে সর্ব্বদা আলফা বা বিটা ক্ষরণের পরে ঘটে থাকে তা অনেকদিন পর্য্যন্ত বোঝা যায়নি। রাদারফোর্ড এবং উস্টার এবিষয়ে কতকগুলি পরীক্ষা করেন, এঁদের পরীক্ষণীয় বিষয় ছিল RaB ($_{82}Pb^{214}$) আইসোটোপের ক্ষরণোত্তর উদ্ভূত বিভিন্ন রঞ্জনরশ্মিগুলি সম্বন্ধে অনুসন্ধান করা। RaB-এর অর্দ্ধজীবনকাল 26·8 মিনিট, এটি ইলেকট্রন ও গামারশ্মি বিকিরণ করে, এর বিটারশ্মির বর্ণালীতে একাধিক বিভিন্ন উচ্চশিখর দেখা যায় যেগুলি অন্তঃস্থ পটপরিবর্ত্তনের দ্বারা সৃষ্ট হয়। অন্তঃস্থ পটপরিবর্ত্তনের ফলে কক্ষীয় ইলেকট্রনের সেলে একটি শূন্যতা সৃষ্টি হয় এবং তখন অপরাপর সেলগুলি থেকে পরাবর্ত্তন ঘটতে থাকে, এভাবে বিভিন্ন রঞ্জনরশ্মি আলোককণা সৃষ্টি হয়। রাদারফোর্ড এবং উস্টার RaB আইসোটোপের বিটাক্ষয়োত্তর উৎপন্ন কতকগুলি রঞ্জনরশ্মি L-রেখার তরঙ্গদৈর্ঘ্য নির্ণয় করেন এবং লক্ষ্য করেন যে, ঐসব তরঙ্গদৈর্ঘ্যের পরিমাণ সৃষ্টিকারী পরমাণুর পারমাণবিক সংখ্যা 83-এর সঙ্গে সামঞ্জস্যপূর্ণ। যেহেতু RaB-এর বিটা ক্ষরণের ফলে পারমাণবিক সংখ্যা 82 থেকে 83-তে রূপান্তরিত হয়, এথেকে বোঝা যায় যে, অন্তঃস্থ পরিবর্ত্তন ঘটে পারমাণবিক সংখ্যার পরিবর্ত্তনের পর অর্থাৎ বিটা ক্ষরণের পর। এটা নিশ্চিতভাবে প্রমাণ করা সম্ভব হয়েছে যে গামারশ্মিতে যে শক্তি ক্ষরিত হয় অন্তঃস্থ পটপরিবর্ত্তনের দ্বারাও ঠিক একই পরিমাণের শক্তি ক্ষরিত হয়, অর্থাৎ উভয় প্রক্রিয়াই কেন্দ্রীনের ভিতর অভিন্ন ধরণের পরাবর্ত্তন নির্দ্দেশ করে।

9·1 সারণীতে কতগুলি বিটাকণার (RaB) শক্তি নির্দ্দেশ করা হয়েছে। ইলেকট্রনের সেল যেগুলি থেকে পটপরিবর্ত্তন ঘটছে সেগুলি জেনা গেছে এদের মধ্যে পরাবর্ত্তনের ফলে উৎপন্ন বিশেষ বিশেষ রঞ্জনরশ্মিগুলির

এবং বিভিন্ন সেলের ভিতর ইলেকট্রনের বন্ধনশক্তির পরিমাণ লক্ষ্য ক'রে। উৎখাত ইলেকট্রনটির গতিশক্তি এবং এর বন্ধনশক্তির যোগফল হ'ল পটপরিবর্তিত (converted) গামারশ্মিটির শক্তির সমান। পরীক্ষালব্ধ ফলাফল 9·1 সারণীতে দেখান হয়েছে, পটপরিবর্তনের পর বিভিন্ন প্রকারে রঞ্জনরশ্মি পরাবর্তন ঘটতে পারে কিন্তু গড়ে প্রত্যেকক্ষেত্রেই নিঃসারিত শক্তির পরিমাণ প্রায় সমান।

9·1 সারণী

বিভিন্ন ইলেকট্রন সেলের মধ্যে গামারশ্মির পটপরিবর্তন

পটপরিবর্তনের স্তর	ইলেকট্রনের বন্ধনশক্তি Z=83 (কিলোইভি)	বিটারশ্মির শক্তি (কিলোইভি)	মোট নিঃসারিত শক্তি (কিলোইভি)
L_I	16·34	36·74	53·08
L_{II}	15·67	37·37	53·04
L_{III}	13·38	39·63	53·01
M_I	3·99	48·85	52·84
M_{II}	3·68	49·10	52·78
			গড় 52·92

ক্ষরিত গামারশ্মির শক্তি একটি স্ফটিক বর্ণালী মাপনীর সাহায্যে সরাসরি পরিমাপ করা সম্ভব এবং নিরপেক্ষভাবে পরিমাপ করলে RaB-এর ক্ষরণজাত গামারশ্মির যে শক্তি পাওয়া যায় তা হ'ল 53·3 কিলোইভি যা অন্তঃস্থ পটপরিবর্তনের গড় শক্তি 52·92-এর সঙ্গে সম্পূর্ণ সামঞ্জস্যপূর্ণ। এই প্রকারের অভিনতা লক্ষ্য করা গিয়েছে আরও বহুসংখ্যক তেজস্ক্রিয় কেন্দ্রীনের মধ্যে এবং এসব পরীক্ষা থেকে চিহ্নিতভাবে প্রমাণিত হয় যে গামারশ্মি বিকিরণ এবং অন্তর্নিহিত পটপরিবর্তন উভয়ই তেজস্ক্রিয় কেন্দ্রীনের অভিন্ন পরাবর্তনকে নির্দেশ করে।

অন্তঃস্থ পটপরিবর্তনকে পরমাণুর একধরণের আভ্যন্তরীণ আলোকবিদ্যুৎ প্রক্রিয়া মনে করা ভুল হবে। অর্থাৎ মনে হতে পারে যে প্রথমে কেন্দ্রীনের ক্ষরণের ফলে গামারশ্মি উৎপন্ন হচ্ছে এবং ঐ রশ্মিটি পরে ইলেকট্রন সেলের ভিতর শোষিত হয়ে গিয়ে আলোকবিদ্যুৎ প্রক্রিয়ায় দ্বারা অন্তর্নিহিত পটপরিবর্তনের জন্ম দিচ্ছে, কিন্তু এ ধারণা ভুল। কিছু কিছু কেন্দ্রীন আছে

কেন্দ্রের মধ্য থেকে গামা ক্ষরণ ঘটতে পারে না, কিন্তু অর্ন্তনিহিত পটপরিবর্তন ঘটা সম্ভব। যেসব পরাবর্তনের ক্ষেত্রে কেন্দ্রীনের ঘূর্ণির পরিমাণ পরাবর্তনের পূর্বে এবং পরে শূন্য থাকে এদের বলা হয় $0 \rightarrow 0$ পরাবর্তন, গামা ক্ষরণের দ্বারা এই পরাবর্তনগুলি ঘটতে পারে না কারণ আলোককণা এক একক পরিমাণ কৌণিক ভরবেগ বহন করে। কিন্তু কেন্দ্রীনের এইপ্রকার পরাবর্তনও ঘটতে দেখা যায়, তবে এতে কোন গামারশ্মি নির্গত হয় না; শুধু অর্ন্তনিহিত পটপরিবর্তন-ঘটিত ইলেকট্রনের আবির্ভাব ঘটে। এথেকেই প্রমাণ হয় যে অর্ন্তনিহিত পটপরিবর্তনে প্রথমে গামারশ্মি নির্গত হয়ে পরে আলোকবিদ্যুৎ প্রক্রিয়া সৃষ্টি করে এই ধারণা ঠিক নয়, গামা ক্ষরণের মতই এটিও একটি সরাসরি কেন্দ্রীনপ্রক্রিয়া।

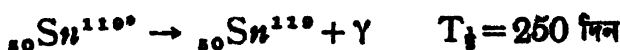
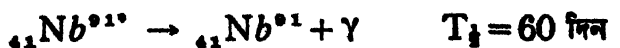
অন্তঃস্থ পরাবর্তন খুব বেশী ঘটতে দেখা যায় ভারী মৌলগুলিতে এবং যখন গামারশ্মির শক্তি হয় $<0{\cdot}5$ এমইভি। পারমাণবিক সংখ্যা <20 মৌলগুলিতে অন্তঃস্থ পরাবর্তন ঘটতে দেখা যায় না।

আইসোমার (Isomer)

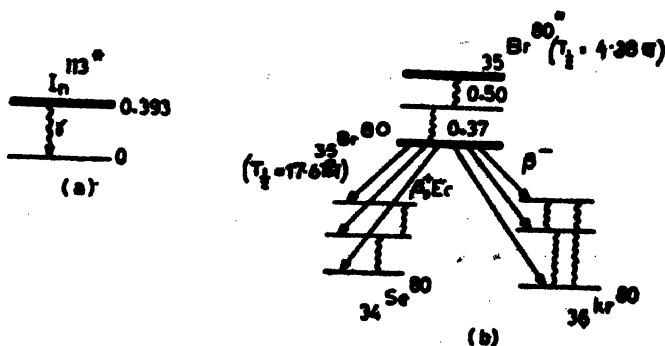
গামা ক্ষরণ বিটা বা আলফা ক্ষরণের সঙ্গে সঙ্গেই প্রায় ঘটে থাকে একথা একটু আগে বলা হয়েছে। এই মন্তব্য অধিকাংশ তেজস্ক্রিয় ক্ষরণের ক্ষেত্রেই সত্য, তবে সামান্য কিছুসংখ্যক কেন্দ্রীনের ভিতর গামাক্ষরণ যথেষ্ট বিলম্বিত হতে দেখা যায়। এইরকম একটি উদাহরণ হ'ল তেজস্ক্রিয় In^{113} আইসোটোপের ক্ষরণ। এই ক্ষরণে শুধু গামারশ্মি বিকিরিত হতে দেখা যায় এবং এর অর্দ্ধজীবনকাল 103 মিনিট। এইরকম বিলম্বিত ক্ষরণ থেকে স্পষ্টই বোঝা যায় যে কিছু কিছু কেন্দ্রীনের জোড়া দেখা যায় যাদের পরস্পরের আধান ও ভরসংখ্যা অভিন্ন কিন্তু এদের তেজস্ক্রিয় ধর্ম্মাবলী পৃথক। এই ধরণের কেন্দ্রীনগুলিকে বলা হয় আইসোমার এবং এই ঘটনাগুলিকে কেন্দ্রীনের আইসোমার অবস্থা আখ্যা দেওয়া হয়; এইরকম আরও কয়েকটি দৃষ্টান্ত হ'ল

$$_{41}Nb^{91*} \rightarrow {}_{41}Nb^{91} + \gamma \qquad T_{\frac{1}{2}} = 60 \text{ দিন}$$

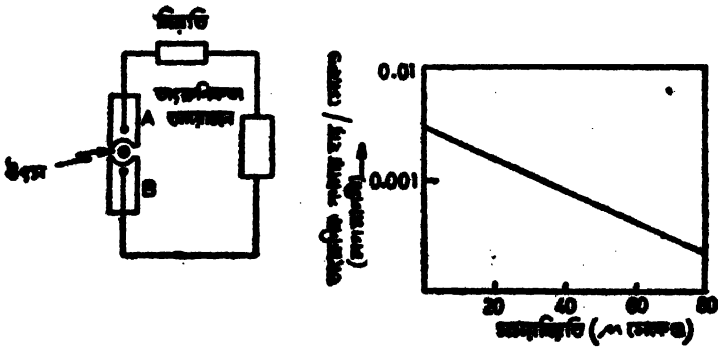
$$Br^{80*} \rightarrow Br^{80} + \gamma \qquad T_{\frac{1}{2}} = 4{\cdot}4 \text{ ঘণ্টা}$$

$$_{50}Sn^{119*} \rightarrow {}_{50}Sn^{119} + \gamma \qquad T_{\frac{1}{2}} = 250 \text{ দিন}$$

(*) চিহ্ন গামাক্ষরণশীল উত্তেজিত আইসোমার অবস্থাকে নির্দ্দেশ করে।

বিভিন্ন আইসোমার জোড়ার সভ্য-কেন্দ্রীনগুলি বিভিন্ন উপায়ে ক্ষয়িত হতে পারে। সবচেয়ে সহজ ক্ষরণের ধরণ হয় যখন উত্তেজিত আইসোমার অবস্থা

থেকে গামা ক্ষরণ ঘটার ফলে কেন্দ্রীনটি এর স্থায়ী ভূমিস্তর অবস্থায় এসে পৌঁছায় ; ঠিক এইরকম ক্ষরণ ঘটে In^{113*} আইসোমারের মধ্যে, একটি 0·39 এমইভি গামারশ্মি ক্ষরণ ক'রে অবশেষে এটি স্থায়ী ভূমিস্তরে এসে পৌঁছায়, 9·15(a) চিত্রে এই আইসোমার পরাবর্ত্তনটি বোঝান হয়েছে। অপর একটি বিখ্যাত উদাহরণ হ'ল Br^{80*} আইসোমারের ক্ষরণ, এটি অপেক্ষাকৃত জটিল কারণ আইসোমার পরাবর্ত্তনের পর কেন্দ্রীন যে স্তরে উপনীত হয় সেটিও তেজস্ক্রিয়, এটি ইলেকট্রন ক্ষরণ, পজিট্রন ক্ষরণ অথবা ইলেকট্রন আহরণ, এদের যেকোন একটি উপায়ে পুনরায় ক্ষরিত হতে পারে। ব্রোমিনের এই আইসোমারটি মন্থর নিউট্রনের আঘাতে $Br^{79}+n \rightarrow Br^{80}+\gamma$ বিক্রিয়া দ্বারা প্রস্তুত করা যায়, এর ক্ষরণের প্রকৃতি বিস্তৃতভাবে অনুসন্ধান করা হয়েছে। আইসোমারটির দুটি উত্তেজিত গামারশ্মি স্তর দেখা যায়, এদের ভিতর দিয়ে পরাবর্ত্তনের সময় 0·050 এবং 0·037 এমইভি গামারশ্মি উৎপন্ন হয় এবং এই গামা ক্ষরণের মোট অর্দ্ধজীবনকাল 4·4 ঘণ্টা। ক্ষরণোত্তর উৎপন্ন আইসোমার স্তরটির তেজস্ক্রিয় ক্ষরণের মোট অর্দ্ধজীবনকাল 17·6 মিনিট। 9·15 চিত্রে এই ক্ষরণটির প্রকৃতি দেখান হয়েছে।

চিত্র 9·15 : In^{113} ও Br^{80} আইসোমার কেন্দ্রীনের ক্ষরণ।

ডিবেনেডিটি এবং ম্যাকগাওয়ন বিশেষ পরীক্ষার আয়োজনের সাহায্যে আইসোমার পরাবর্ত্তনের অপেক্ষাকৃত অনেক ক্ষুদ্রতর জীবনকাল মাপতে সক্ষম হন। এভাবে গামা ক্ষরণের যে অর্দ্ধজীবনকাল তাঁরা মাপতে সক্ষম হন তা হ'ল প্রায় 10^{-7} সেকেণ্ড, পরবর্ত্তী কালে এর চেয়েও কম অর্দ্ধজীবনকাল মাপা সম্ভব হয়েছে। এদের পরীক্ষার আয়োজন বেশ সরল এবং 9·14 চিত্রে তা বর্ণনা করা হয়েছে। পরীক্ষাধীন তেজস্ক্রিয় পদার্থ A ও B গাইগার মূলার গণনযন্ত্রের মধ্যে রাখা হয়েছে। A গণনযন্ত্রটি থেকে উৎপন্ন বিভব

[illegible]টিকে বৈদ্যুতিক আয়োজনের দ্বারা কিয়ৎপরিমাণে বিলম্বিত করা হয়, এই বিলম্বের পরিমাণ নির্দিষ্ট, ধরা যাক t, কিন্তু একে পরিবর্তিত করা চলে (পরীক্ষার এই সময়বিরতি 1 মাইক্রোসেকেণ্ড থেকে 10^4 মাইক্রোসেকেণ্ডের মধ্যে রাখা হয়)। অবশেষে দুই গণনকারের ভিতর থেকে দুটি বিভববাত্যার উৎপন্ন হয়ে একটি তাৎক্ষণিকতা আয়োজনের ভিতর উপনীত হয়। বর্তনীটি সেইসব ঘটনাগুলি পর্য্যবেক্ষণ করে যেখানে প্রথম A গণনকারের ভিতর একটি বিভববাত্যায় উৎপন্ন হয়, তারপর t সময় পর B গণনকারের ভিতর অপর একটি বিভববাত্যায় উৎপন্ন হয়।

চিত্র 9·16

আইসোমার কেন্দ্রীনের অর্দ্ধজীবনকাল পরিমাপের জন্য তাৎক্ষণিকতা বর্তনীর আয়োজন এবং সময় বনাম তাৎক্ষণিক গণনার লেখ। এই সরলরেখার আপতন থেকে অর্দ্ধজীবনকাল নির্ণয় করা যায়।

এবার যদি তাৎক্ষণিকতা আয়োজনে দৃষ্ট ঘটনাগুলি (লগ মাপনীতে) সময়বিরতির অপেক্ষক হিসাবে একটি লেখচিত্রে আঁকা যায় তবে 9·16 চিত্রের মত একটি সরল লেখ পাওয়া যায়। পরীক্ষাটি করা হয়েছে $_{73}Ta^{181}$ আইসোমার আইসোটোপের উপর, 9·16 চিত্রের লেখটি বিচার ক'রে এর গামা ক্ষরণের গড় জীবনকাল 22 মাইক্রোসেকেণ্ড নির্ণীত হয়েছে, ক্ষরিত গামারশ্মির শক্তি 140 কিলোইভি, Ta^{181} এর এই ক্ষণস্থায়ী উত্তেজিত অবস্থা সৃষ্টি হয় $_{72}Hf^{181}$এর বিটা ক্ষরণের পর।

ইলেকট্রনিক পদ্ধতির দ্বারা 10^{-9} সেকেণ্ড পর্য্যন্ত অর্দ্ধজীবনকাল নির্ণয় করা সম্ভব হয়েছে এবং এই আয়োজন পদ্ধতির এই হ'ল ন্যূনতম সীমা কারণ বিভিন্ন ইলেকট্রনিক বর্তনীতে যেসব স্ব স্ব স্বতঃবিরতি থাকে তাই শেষ পর্য্যন্ত শুদ্ধ পরিমাপের সীমা নির্দেশ করে।

প্রশ্নমালা

(1) একটি আলফাকণার গতিবেগ 1.5×10^9 সেমি/সেক, এই গতিবেগে এর ভর এবং স্থির ভরের অনুপাত কত? এর গতিশক্তি এবং Br-এর পরিমাণ কত?

[$m/m_0 = 1.001255, E = 4.65$ এমইভি,
$Br = 3.111 \times 10^5$ গস-সেমি]

(2) ধরা যাক একটি কেন্দ্রীনের ব্যাসার্ধ নিম্নলিখিত সূত্রের দ্বারা প্রকাশিত

$$r = 1.5 \times 10^{-13} A^{\frac{1}{3}} \text{ সেমি}$$

যেখানে A ভরসংখ্যা। এই সূত্রের সাহায্যে নিম্নলিখিত কেন্দ্রীনগুলি ও প্রোটনের মধ্যে চরম বিকর্ষণ বিভবের পরিমাণ নির্ণয় কর:

$$Ne^{20}, Sn^{112}, Th^{232}$$

[U = 2.5 এমইভি, 8.2 এমইভি এবং 12.0 এমইভি]

(3) Ba^{131} থেকে উৎপন্ন γ রশ্মিগুলি একটি সীসার পাতের উপর আপতিত ক'রে ফোটো ইলেকট্রন উৎপন্ন করা হয়েছে, এদের মধ্যে সুস্পষ্ট চারটি শ্রেণীর ফোটো ইলেকট্রনের আবির্ভাব লক্ষ্য করা যাচ্ছে যাদের Br পরিমাণগুলি যথাক্রমে 1250, 1445, 2050 এবং 2520 গস-সেমি। সীসার K-সেলের ইলেকট্রনের বন্ধনশক্তি 0.089 এমইভি, গামারশ্মিগুলির শক্তি কত? [0.212, 0.248, 0.377, 0.490 এমইভি]

(4) UX_1 এবং UX_2 থেকে নির্গত বিটাকণার এ্যালুমিনিয়ামের ভিতর শোষণের সহগ যথাক্রমে 170 এবং 6.7 সেমি^{2}/গ্রাম, এই রশ্মিগুলির তীব্রতা $\frac{1}{100}$তম অংশে পরিণত করতে এ্যালুমিনিয়ামের (ঘনত্ব 2.7 গ্রাম/সেমি^{3}) কত পুরুত্ব প্রয়োজন হয়? [0.01 সেমি ; 0.25 সেমি]

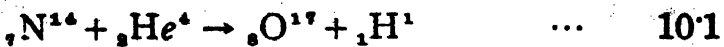
(5) ThC'' থেকে নির্গত গামারশ্মির শোষণের সহগ সীসার ভিতর 0.46/সেমি। প্রাথমিক তীব্রতা $\frac{1}{10}$ এবং $\frac{1}{100}$তম অংশে পরিণত করতে সীসার কত পুরুত্ব প্রয়োজন হবে? [5.0 সেমি ; 10.0 সেমি]

(6) ধরা যাক U^{238} কেন্দ্রীনের ব্যাসার্ধ 9×10^{-13} সেমি, তাহলে ঐ কেন্দ্রীন থেকে নির্গত একটি আলফাকণার ঠিক ঐ দূরত্বে কত কুলম্ব বিভব শক্তি হবে? [28.8 এমইভি]

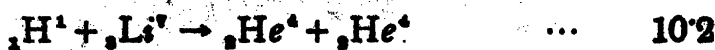
দশম অধ্যায়

কেন্দ্রীনঘটিত বিক্রিয়া ও নিউট্রনের আবিষ্কার

পরমাণুর দ্বারা আলফাকণার বিচ্ছুরণ সম্বন্ধে রাদারফোর্ড অনেক গবেষণা করেন, এর বিস্তৃত বিবরণ পূর্ব্বেই দেওয়া হয়েছে। বিভিন্ন মৌলের উপর আলফাকণার বিচ্ছুরণ সম্বন্ধে গবেষণা করার সময় রাদারফোর্ড একটি পরীক্ষায় লক্ষ্য করেন যে তেজস্ক্রিয় $_{84}Po^{214}$ কেন্দ্রীন থেকে উৎপন্ন 7·68 এমইভি শক্তিবিশিষ্ট আলফাকণার দ্বারা বাতাসের নাইট্রোজেন পরমাণুকে আঘাত করলে শক্তিশালী প্রোটন উৎপন্ন হয়। তিনি লক্ষ্য করেন যে তেজস্ক্রিয় পলোনিয়ামের উৎস যদি একটি জিঙ্ক সালফাইডের আস্তরণ মাখান পর্দার নিকটে রাখা হয় এবং পর্দা ও উৎস উভয়ের ভিতর দূরত্ব বাড়িয়ে এতদূর করা হয় যাতে বাতাসের ভিতর পলোনিয়াম আলফাকণার দৌড়-দূরত্বের তুলনায় তা অনেক বেশী হয়, তাহলেও ঐ পর্দার ভিতর চমকের সৃষ্টি হতে থাকে। আরও বিস্তৃত পরীক্ষার পর রাদারফোর্ড পরিশেষে এই সিদ্ধান্তে উপনীত হন যে, এক্ষেত্রে আসলে নাইট্রোজেন পরমাণুর কেন্দ্রীন এবং আলফাকণার মধ্যে বিক্রিয়া ঘটছে এবং তার ফলে একটি শক্তিশালী প্রোটন উৎপন্ন হচ্ছে এবং এই প্রোটনই অতিরিক্ত পথ অতিক্রম ক'রে এসে দীপনশীল পর্দার উপর চমকের সৃষ্টি করছে। এই বিক্রিয়াটি নিম্নলিখিত উপায়ে লেখা যায়,

$$_{7}N^{14}+{}_{2}He^{4}\rightarrow{}_{8}O^{17}+{}_{1}H^{1} \qquad \cdots \qquad 10·1$$

এবং এইটিই হ'ল পরীক্ষাগারে দৃষ্ট প্রথম কেন্দ্রীনঘটিত বিক্রিয়া। পরবর্ত্তী কালে ব্ল্যাকেট মেঘকক্ষের ভিতর এই বিক্রিয়াটি লক্ষ্য করেন, দেখা যায় যে প্রতি 5×10^{4} নিক্ষিপ্ত আলফাকণার জন্য একবার এই বিক্রিয়াটি ঘটছে। এরপর আরও বহু এবং বিভিন্ন ধরণের কেন্দ্রীনঘটিত বিক্রিয়া আবিষ্কৃত হয়েছে যাদের সম্বন্ধে বর্ত্তমান অধ্যায়ে আমরা ক্রমশঃ আলোচনা করব। রাদারফোর্ড প্রাকৃতিক তেজস্ক্রিয়তাজাত উচ্চশক্তিসম্পন্ন আলফাকণা নিয়োগ ক'রে উপরোক্ত বিক্রিয়া লক্ষ্য করেন, বর্ত্তমানে সাধারণতঃ কৃত্রিম উপায়ে ত্বরিত উচ্চশক্তিসম্পন্ন প্রোটন, ডয়টেরন, আলফাকণা কিংবা কোন কোন হাল্কা মৌলের কেন্দ্রীন এই কাজে ব্যবহৃত হয়। শক্তিশালী গামারশ্মির দ্বারাও কেন্দ্রীনের বিক্রিয়া ঘটতে পারে। কৃত্রিম উপায়ে ত্বরিত প্রোটনের সাহায্যে প্রথম

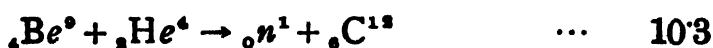
কেন্দ্রীনঘটিত বিক্রিয়া লক্ষ্য করেন কক্‌ক্রফ্‌ট এবং ওয়ালটন, এঁরা নিম্নলিখিত বিক্রিয়াটি আবিষ্কার করেন

$$_{1}H^{1} + {}_{3}Li^{7} \rightarrow {}_{2}He^{4} + {}_{2}He^{4} \qquad \cdots \qquad 10{\cdot}2$$

এই পরীক্ষায় কৃত্রিম উপায়ে ত্বরিত 0·5 এমইভি শক্তিবিশিষ্ট প্রোটনের দ্বারা খুব পাতলা লিথিয়াম ধাতুর ঘাতবহের উপর আঘাত করা হয় এবং লক্ষ্য করা যায় যে উৎপন্ন কণাগুলির বাতাসের ভিতর দৌড়দূরত্ব প্রায় পলোনিয়াম আলফা-কণাগুলির দৌড়দূরত্বের সমান। কিছুসংখ্যক পরীক্ষায় উৎপন্ন কণাগুলিকে আয়নীভবন কক্ষের ভিতর নিয়ে এসে এদের প্রকৃতি অনুশীলন করার ব্যবস্থা ছিল এবং সেক্ষেত্রেও দেখা গিয়েছে যে কণাগুলির দ্বারা সৃষ্ট বিভবব্যত্যয়ের পরিমাণ এবং আকৃতি ঠিক পলোনিয়াম আলফাকণাদের দ্বারা সৃষ্ট বিভব-ব্যত্যয়ের মতই, সুতরাং উপরোক্ত বিক্রিয়াটিই যে ঘটছে সে-সম্বন্ধে ধারণা আরও দৃঢ় হয়। পরবর্তী কালে আরও বিস্তৃততর পরীক্ষায় ভরমাপনীর সহায়তায় বিক্রিয়াজাত হিলিয়াম কেন্দ্রীনদ্বয়ের শক্তি মাপা হয়েছে, দেখা যায় যে এদের উভয়ের শক্তি 8·9 এমইভি যা পলোনিয়াম আলফাকণার শক্তির সঙ্গে তুলনীয়, সুতরাং কেন যে এদের দৌড়দূরত্ব পলোনিয়াম আলফাকণাগুলির অনুরূপ তা সহজেই বোঝা যায়। 0·5 এমইভি শক্তির প্রোটন ব্যবহার ক'রে 10·2 বিক্রিয়াটি থেকে অতিরিক্ত 17·3 এমইভি শক্তি উৎপন্ন হয়, এই উদাহরণে আমরা দেখতে পাই কিভাবে কেন্দ্রীনঘটিত বিক্রিয়া থেকে বিপুল পরিমাণে শক্তি উৎপাদন সম্ভব। তবে এভাবে শক্তি উৎপাদনের মূল সমস্যা হচ্ছে এই যে ব্যাপকহারে শক্তিশালী প্রোটন উৎপাদনের সহজ কোন উপায় এখনও আবিষ্কৃত হয়নি। ত্বরণযন্ত্রে অতি সামান্যসংখ্যক প্রোটনকে একত্রে ত্বরিত করা যায়। এদের দ্বারা সৃষ্ট বিক্রিয়ার সংখ্যা নগণ্য এজন্য সম্ভবতঃ একমাত্র বিস্ফোরক হিসাবে ছাড়া অন্য কোন উপায়ে ব্যবহারিকভাবে উপরোক্ত বিক্রিয়াটি থেকে শক্তি উৎপাদনের সম্ভাবনা এখনও সুদূরপরাহত।

উপরিলিখিত বিক্রিয়াদ্বয় হ'ল কেন্দ্রীনবিজ্ঞানে আবিষ্কৃত প্রথম কেন্দ্রীনঘটিত দুটি বিক্রিয়া। দুটি সংরক্ষণ নীতি এইসব সমস্ত বিক্রিয়াগুলির ক্ষেত্রে সার্বজনীনভাবে প্রযুক্ত হয়ে থাকে, এরা হ'ল যথাক্রমে মোট কেন্দ্রকণার সংখ্যার সংরক্ষণ নীতি এবং মোট আধানের সংরক্ষণ নীতি। এই সংরক্ষণ নীতিগুলি নির্দেশ করে যে মোট কেন্দ্রকণার সংখ্যা অর্থাৎ মোট নিউট্রন ও প্রোটন সংখ্যা, বিক্রিয়ার পূর্বে এবং পরে অভিন্ন থাকে, এছাড়া মোট আধানের পরিমাণও বিক্রিয়ার পূর্বে এবং পরে অভিন্ন থাকে।

10·2 বিক্রিয়াটিতে বিক্রিয়ার পূর্বে ক্রিয়াশীল কেন্দ্রীনদ্বয়ের কেন্দ্রকণাগুলির যোগফল 8, বিক্রিয়ার পরেও তাই। তেমনি বিক্রিয়ার পূর্বে কেন্দ্রীনদ্বয়ের মোট আধানের পরিমাণ (e^+-এর এককে) 4, বিক্রিয়ার পরেও ঐ যোগফলের পরিমাণ অভিন্নই রয়েছে। যেসব বিক্রিয়ার বিক্রিয়ান্তে দুটি বিভিন্ন কেন্দ্রীন উৎপন্ন হয় তাদের ক্ষেত্রে একটির স্বরূপ জানা থাকলে উপরোক্ত সংরক্ষণ নীতিদ্বয় প্রয়োগ ক'রে অপরটি সহজেই নির্ধারণ করা যায়। ক্ষরণ প্রক্রিয়াতেও এই সংরক্ষণ নীতিগুলি সমানভাবে প্রযোজ্য। এছাড়া আরও দুটি সাধারণ সংরক্ষণ নীতি হচ্ছে শক্তি ও ভরবেগ সংরক্ষণ নীতি, এদের বিষয়েও আমরা সংক্ষিপ্তভাবে আলোচনা করব।

কেন্দ্রীনঘটিত বিক্রিয়াসংক্রান্ত গবেষণার আরেকটি উল্লেখযোগ্য অবদান হ'ল নিউট্রনের আবিষ্কার। যদিও এখন আমরা জানি যে নিউট্রন জগতের সমুদয় পদার্থের অন্যতম উপাদান, 1932 খৃষ্টাব্দের পূর্বে কেউই এর অস্তিত্ব সম্বন্ধে সচেতন ছিলেন না। নিউট্রনের উৎপাদন প্রথম লক্ষ্য করেন বোটে এবং বেকার, নিম্নলিখিত বিক্রিয়ায়

$$ {}_4Be^9 + {}_2He^4 \rightarrow {}_0n^1 + {}_6C^{12} \quad \cdots \quad 10·3 $$

যদিও এভাবে উৎপন্ন কণাটি যে নিউট্রন সেটা তাঁরা অনুধাবন করতে পারেননি। এঁরা লক্ষ্য করেন যে পলোনিয়াম আলফাকণার সাহায্যে বেরিলিয়ামকে আঘাত করলে তীব্র অন্তর্গমনক্ষম এক ধরণের বিকিরণের সৃষ্টি হয় যা কয়েক সেন্টিমিটার পুরু সীসার পাত ভেদ ক'রে বেরিয়ে যেতে পারে। বোটে এবং বেকার অনুমান করলেন এই বিকিরণ সম্ভবতঃ তীব্রশক্তিসম্পন্ন গামারশ্মি। এই বিকিরণ সামান্য পরিমাণে আয়নীভবন ঘটাতে পারে যার সাহায্যে এর অস্তিত্ব নিরূপণ করা সম্ভব এবং এর অন্তর্গমন ক্ষমতা তৎকালীন জ্ঞাত যেকোন গামাবিকিরণের তুলনায় অনেক বেশী। পরে ক্যুরী এবং জোলিও দেখালেন যে এই বিকিরণ মোমের উপর আপতিত হলে তার ফলে তীব্রশক্তিসম্পন্ন প্রোটন নির্গত হয়ে আসে। এইসব প্রোটনের সর্বাধিক শক্তি হয় প্রায় 5 এমইভি। ক্যুরী এবং জোলিও এই বিকিরণকে গামারশ্মি ব'লেই মনে করেছিলেন এবং সেই বিশ্বাসবশতঃ এঁরা সিদ্ধান্ত করলেন যে শক্তিশালী গামারশ্মির সংঘর্ষে কম্পটন প্রক্রিয়ার দ্বারা মোমের ভিতর থেকে প্রোটন বেরিয়ে আসছে। ষষ্ঠ অধ্যায়ে কম্পটন প্রক্রিয়ার যে বিবরণ দেওয়া হয়েছে সেইসব সমীকরণ ও সম্বন্ধগুলি ব্যবহার ক'রে গামারশ্মির শক্তি কত হলে কম্পটন প্রক্রিয়ায় বিক্ষুরিত প্রোটনের শক্তি 5 এমইভি হবে তা অনায়াসেই গণনা করা যায়, দেখা যায় যে সেক্ষেত্রে আপতিত গামারশ্মি আলোককণার শক্তি

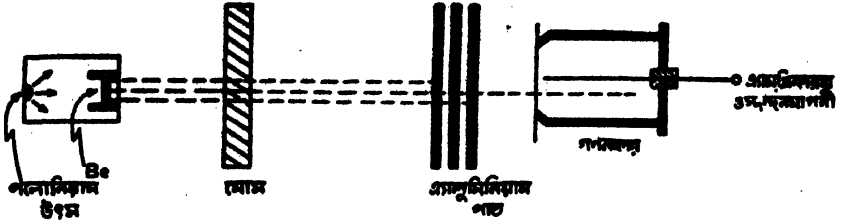
হতে হবে প্রায় 50 এমইভি। বিকিরণটি যদি সত্যিসত্যিই গামারশ্মি হয়ে থাকে তবে 10·3 বিক্রিয়ার বদলে একটি $_6C^{13}$ কেন্দ্রীন এবং একটি 50 এমইভি গামারশ্মি আলোককণার সৃষ্টি হবে। পরিশিষ্টের সারণী থেকে যদি আমরা $_4Be^9$ ও $_2He^4$ কেন্দ্রীনের মোট ভর এবং $_6C^{13}$ কেন্দ্রীনের ভরের তুলনা করি তাহলে পাই

$$M_{_4Be^9}+M_{_2He^4}-M_{_6C^{13}}=0{\cdot}0114 \text{ এএমইউ}=10{\cdot}6 \text{ এমইভি}$$

এর সঙ্গে যোগ করতে হবে পলোনিয়াম আলফাকণার গতিশক্তি, ধরা যাক গড়ে 7 এমইভি, এবং বিয়োগ করতে হবে $_6C^{13}$ কেন্দ্রীনের পশ্চাদপসরণ শক্তি। যদি শেষোক্ত শক্তির পরিমাণ আমরা অবহেলা করি তবে এই বিক্রিয়া থেকে উৎপন্ন সম্ভাব্য গামারশ্মির চরমশক্তি হিসাবে আমরা পাই 17·6 এমইভি। সুতরাং এই বিক্রিয়ায় এইভাবে গামারশ্মি সৃষ্টির প্রকল্প যুক্তিযুক্ত নয়।

স্যাডউইকের (Chadwick) পরীক্ষা

1932 খৃষ্টাব্দে স্যাডউইক প্রথম প্রস্তাব করলেন যে বোটে এবং বেকারের বিক্রিয়ায় যে অন্তর্গমনক্ষম বিকিরণটি উৎপন্ন হচ্ছে তা গামারশ্মি নয়, বরং আধানশূন্য এক ধরণের কণা যার ভর প্রোটনের ভরের প্রায় সমান। আধান-শূন্য হবার ফলেই কণাটির গামারশ্মির মতই তীব্র অন্তর্গমন ক্ষমতা থাকে এবং মোমের উপর আপতিত হয়ে এটি সাধারণ সংঘর্ষের দ্বারাই তীব্রশক্তিসম্পন্ন প্রোটন উৎখাত করতে পারে। এভাবে বিচার করলে পূর্বোক্ত জটিলতাগুলি সহজেই ব্যাখ্যা করা যায়। মোমের মধ্যে উৎপন্ন শক্তিশালী প্রোটনগুলির শক্তি খুব সূক্ষ্মভাবে নির্ণয় করার জন্য স্যাডউইক যে পরীক্ষার আয়োজন করেন তা 10·1 চিত্রে দেখান হয়েছে। পলোনিয়াম আলফাকণার দ্বারা বেরিলিয়ামকে আঘাত ক'রে যে শক্তিশালী বিকিরণ উৎপন্ন হয় তা মোমের ভিতর থেকে প্রোটন নির্গত করায় এবং এই প্রোটনগুলি নিকটে রাখা এ্যালুমিনিয়াম পাতের তাড়া ভেদ ক'রে একটি আয়নীভবন কক্ষের উপর এসে পড়ে, এই গণনকারের দ্বারা আপতিত প্রোটনগুলির সংখ্যা গণনা করা হয়। এ্যালুমিনিয়াম পাতের পুরুত্ব ক্রমশঃ বর্দ্ধিত ক'রে যে চরম পুরুত্বে এসে গণনার সংখ্যা শূন্য হয়ে পড়ে তা নির্দ্ধারণ করা যায়। ঐ পুরুত্ব এ্যালুমিনিয়ামের ভিতর উৎখাত চরমশক্তিসম্পন্ন প্রোটনগুলির দৌড়দূরত্ব নির্দেশ করে। এ্যালুমিনিয়ামের ভিতর প্রোটনের দৌড়দূরত্ব জানা থাকলে দৌড়দূরত্ব বনাম শক্তির লেখ থেকে প্রোটনের শক্তি নির্ণয় করা যায়। যদি সংঘর্ষকারী বিকিরণটি পদার্থকণা হয় তবে এর সঙ্গে মুখোমুখি সংঘর্ষের দ্বারাই প্রোটন চরমশক্তি

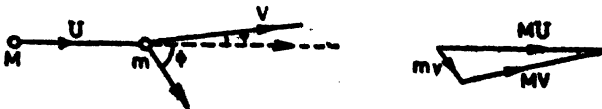
অর্জন করবে ; এইভাবে এই পরীক্ষা থেকে প্রাপ্ত পিছুহটা প্রোটনগুলির চরম-শক্তির পরিমাণ হ'ল 5·7 এমইভি । নিম্নলিখিত সরল গাণিতিক বিশ্লেষণের সাহায্যে উপরিলিখিত মন্তব্যের তাৎপর্য্য বিশ্লেষণ করা যায় ।

চিত্র 10·1

স্যাডউইকের পরীক্ষার আয়োজন ।

ধরা যাক, একটি কণা যার প্রাথমিক ভরবেগ MU অপর একটি কণাকে এসে আঘাত করে যেটি ল্যাবোরেটরী কাঠামোতে স্থির আছে । সংঘর্ষের পর ধরা যাক, আগন্তুক এবং পিছুহটা কণাদ্বয়ের যথাক্রমে $\vec{V}$ এবং $\vec{v}$ গতিবেগ রয়েছে এবং আগন্তুক কণার প্রাথমিক দিকের সঙ্গে এরা যথাক্রমে ψ এবং ϕ কোণে অবস্থান করছে (10·2 চিত্র), ভরবেগ সংরক্ষণের নীতির সাহায্যে আমরা সরাসরি লিখতে পারি

$$M^2V^2 = M^2U^2 + m^2v^2 - 2MmUv\cos\phi$$

তাছাড়া এটি স্থিতিস্থাপক সংঘর্ষ, এখানে গতিশক্তিও সংরক্ষিত হয় সুতরাং

$$\tfrac{1}{2}MU^2 = \tfrac{1}{2}MV^2 + \tfrac{1}{2}mv^2$$

চিত্র 10·2

এবার উপরোক্ত সমীকরণদ্বয়ের ভিতর থেকে M^2V^2 অপনয়ন করলে আমরা পাই

$$v = \frac{2MU}{M+m}\cos\phi$$

সুতরাং পিছুহটা কণাটির গতিশক্তি হবে

$$T = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{2mM^2U^2}{(M+m)^2}\cos^2\phi$$

$$= \frac{4Mm}{(M+m)^2}E_0\cos^2\phi \qquad \cdots \qquad 10.4$$

এখানে $E_0 = \frac{1}{2}MU^2$, আঘাতকারী কণার গতিশক্তি। লক্ষ্য করতে হবে যে, যে চরমশক্তি বা পিছুহটা কণাটি অর্জন করে তার পরিমাণ $\phi = 0$ সর্তের দ্বারা নির্দ্ধারিত, অর্থাৎ চরমশক্তি অর্জিত হয় যখন মুখোমুখি সংঘর্ষ ঘটে এবং এর পরিমাণ হয়

$$T^{\text{চরম}} = \frac{4MmE_0}{(M+m)^2} \qquad \cdots \qquad 10.5$$

যা E_0-এর সমান হবে যখন $M = m$, এবং $\frac{4M}{m}E_0$-এর সমান হবে যখন $M << m$।

পরবর্তী একটি পরীক্ষায় স্যাডউইক মেঘকক্ষের মধ্যে নাইট্রোজেন কেন্দ্রীনের সঙ্গে এই নবাগত কণাটির পরিক্রিয়া লক্ষ্য করেন। তিনি সোজা সম্মুখে নিক্ষিপ্ত নাইট্রোজেন কেন্দ্রীনগুলির গতিবেগ মেপে এদের শক্তি নির্দ্ধারণ করেন। প্রোটন এবং নাইট্রোজেনের ক্ষেত্রে একই নিউট্রন উৎস ব্যবহার করা হয় এজন্য আগন্তুক কণাগুলির শক্তি উভয় ক্ষেত্রেই অভিন্ন। পরীক্ষায় পিছু-হটা নাইট্রোজেন কেন্দ্রীনের চরমশক্তি নির্দ্ধারিত হয় 1.5 এমইভি। পিছুহটা প্রোটনের চরমশক্তির পরিমাণ পূর্বে উল্লেখ করা হয়েছে। সুতরাং এভাবে দুটি সমীকরণ পাওয়া যায়,

$$\text{প্রোটন :}\quad T^{\text{চরম}} = 5.7 = \frac{4M}{(M+1)^2}E_0$$

$$\text{নাইট্রোজেন :}\quad T^{\text{চরম}} = 1.5 = \frac{56M}{(M+14)^2}E_0$$

এদের সমাধান করলে আমরা পাই, $M = 1.07$ (প্রোটনের ভরের এককে) এবং $E_0 = 5.7$ এমইভি।

এইভাবে পরীক্ষায় অবশ্য খুব নির্ভুলভাবে নিউট্রনের ভর নির্ণয় করা যায় না, কিন্তু নাইট্রোজেন কেন্দ্রীনের পিছুহটা বিচার ক'রে স্যাডউইক প্রমাণ করতে সক্ষম হন যে নিউট্রনের স্থির ভর প্রোটনের নিকটবর্তী এবং এর তুলনায়

অপেক্ষা একটু বেশী। এছাড়া স্যাডউইক He, Li, Be, C, O ইত্যাদি কেন্দ্রীনগুলিরও পিছুহটা গতিবেগ পরিমাপ করেন, এইসব প্রত্যেক ক্ষেত্রেই দেখা যায় যে পিছুহটা শক্তির পরিমাণ 10·4 ও 10·5 সম্বন্ধগুলির এবং উপরোক্ত নিউট্রনের ভরের পরিমাণের সঙ্গে সম্পূর্ণ সামঞ্জস্যপূর্ণ। এথেকে নিঃসন্দেহে প্রমাণিত হয় যে আলফা-বেরিলিয়াম বিক্রিয়ায় যে অজ্ঞাত বিকিরণ সৃষ্টি হচ্ছে তা আসলে নিউট্রন।

নিউট্রনের ভর নির্দ্ধারণের আরও নির্ভুলতর পদ্ধতি হ'ল ডিউটেরনের ফোটো বিচ্ছিন্নকরণ বিক্রিয়া অনুশীলন করা, এই বিক্রিয়ার কথা পূর্ব্বে উল্লেখ করা হয়েছে। স্যাডউইক এবং গোল্ডহাবার (Goldhaber) এই বিক্রিয়ার উপর পরীক্ষা করেন। এদের পরীক্ষায় তেজস্ক্রিয় ThC'' আইসোটোপ থেকে নির্গত 2·62 এমইভি শক্তির গামারশ্মি একটি ডিউটেরিয়াম গ্যাসপূর্ণ গণনকারের ভিতর দিয়ে চালিত ক'রে দেওয়া হয়। গণনকারের ভিতর যে বিভবব্যত্যয় উৎপন্ন হয় তা সহজেই প্রোটনের দ্বারা সৃষ্ট ব'লে প্রমাণ করা সম্ভব হয়। এই বিক্রিয়ার ফলে যে গণনকারের ভিতর নিউট্রনও উৎপন্ন হয় তাও প্রমাণ করা যায়। প্রোটনের যে গড় শক্তি মাপা সম্ভব হয় তা হ'ল 0·185 এমইভি, নিউট্রনের গড় শক্তিও ঐ একই হবে কারণ নিউট্রন ও প্রোটনের ভরদ্বয় পরস্পরের খুবই নিকটবর্ত্তী। এবার যদি এই বিক্রিয়ায় শক্তি সংরক্ষণ নীতি প্রয়োগ করা হয়, অর্থাৎ বিক্রিয়ার পূর্ব্বে এবং পরে মোট শক্তির পরিমাণ সমান এরকম ধরে নেওয়া যায় তাহলে

$$ {}_1D^2 + 2{\cdot}62 \text{ এমইভি} \rightarrow {}_1H^1 + {}_0n^1 + 0{\cdot}37 \text{ এমইভি} $$

$$ {}_1H^1 + {}_0n^1 - {}_1D^2 = 2{\cdot}25 \text{ এমইভি} \quad \cdots \quad 10{\cdot}6 $$

এক্ষেত্রে উপরের প্রতিটি মৌলসূচক ঐসকল পরমাণু বা কণার স্থির শক্তির পরিমাণ নির্দ্দেশ করে। এ্যাস্টনের ভরমাপনীর পরীক্ষা থেকে আমরা জানি যে ডিউটেরিয়ামের অণু দুটি হাইড্রোজেন পরমাণুর তুলনায় সামান্য কিছু হাল্কা, বাস্তবিকপক্ষে

$$ 2\,{}_1H^1 - {}_1D^2 = 1{\cdot}44 \text{ এমইভি} \quad \cdots \quad 10{\cdot}7 $$

এবার 10·6 ও 10·7 একত্রিত করলে আমরা পাই

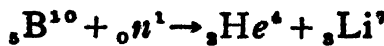
$$ {}_0n^1 - {}_1H^1 = 0{\cdot}81 \text{ এমইভি} $$

পরবর্ত্তীকালে আরও সূক্ষ্মতর উপায়ে এই পরীক্ষাটি করা হয়েছে এবং সেগুলি থেকে প্রাপ্ত ফল হ'ল

$$ {}_0n^1 - {}_1H^1 = 0{\cdot}7826 \pm 0{\cdot}0005 \text{ এমইভি} $$

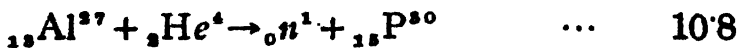
ভর পার্থক্যের এই পরিমাণ থেকে প্রতীয়মান হয় যে নিউট্রন, প্রোটন এবং ইলেকট্রনের একপ্রকার বদ্ধ দশা নয় যেমন প্রথমে অনুমান করেছিলেন রাদারফোর্ড, তবে নিউট্রনের ক্ষরণে যে একটি প্রোটন ও একটি ইলেকট্রন উৎপন্ন হয় সেকথা অবশ্য আগেই উল্লেখ করা হয়েছে।

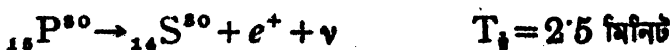
পরে আরও অনেক বিক্রিয়ায় নিউট্রনের উৎপাদন লক্ষ্য করা সম্ভব হয়েছে। এছাড়া নিউট্রন স্বয়ং খুব বিক্রিয়াশীল, কারণ যেহেতু এর আধান শূন্য এর উপর কেন্দ্রীনের কুলম্ব বিকর্ষণী বলের কোন প্রভাব নেই এবং এটি অনায়াসেই কেন্দ্রীনের সংস্পর্শে আসতে পারে যা স্বল্পশক্তিবিশিষ্ট প্রোটন বা আলফাকণার পক্ষে তত সহজে সম্ভব নয়। নিউট্রনের অপর একটি বিখ্যাত বিক্রিয়া হ'ল

$$_{5}B^{10} + _{0}n^{1} \rightarrow _{2}He^{4} + _{3}Li^{7}$$

এই বিক্রিয়াটি খুব বেশী সংখ্যায় ঘটে অর্থাৎ আপতিত নিউট্রনগুলির B^{10} কেন্দ্রীনের সঙ্গে বিক্রিয়া ঘটাবার সম্ভাব্যতা খুব বেশী। এইজন্য এই বিক্রিয়াটি নিউট্রন পর্য্যবেক্ষণের জন্য ব্যবহৃত হয়। একটি আয়নীভবন কক্ষের ভিতর কিছু বোরন ফ্লুরাইড গ্যাস প্রবেশ করিয়ে দেওয়া হয়, নিউট্রন এই কক্ষে প্রবেশ করলে উপরিলিখিত বিক্রিয়াটি সৃষ্টি করে এবং উৎপন্ন শক্তিশালী $_{2}He^{4}$ এবং $_{3}Li^{7}$ কণাদ্বয় যে আয়নীভবনের সৃষ্টি করে তাতে কক্ষের অভ্যন্তরে একটি বিভববৈভ্যত্যয় উৎপন্ন হয়।

কৃত্রিম তেজস্ক্রিয়তা (artificial radioactivity)

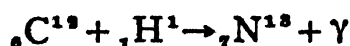
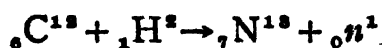
কেন্দ্রীনঘটিত বিক্রিয়ার দ্বারা প্রথম কৃত্রিম তেজস্ক্রিয় আইসোটোপ প্রস্তুত করেন ক্যুরী এবং জোলিও, এঁরা এ্যালুমিনিয়ামের উপর শক্তিশালী আলফাকণা নিক্ষেপ ক'রে নিম্নলিখিত বিক্রিয়াটি লক্ষ্য করেন

$$_{13}Al^{27} + _{2}He^{4} \rightarrow _{0}n^{1} + _{15}P^{30} \qquad \cdots \qquad 10{\cdot}8$$

এভাবে যে ফসফরাস কেন্দ্রীন সৃষ্টি হয় সেটি তেজস্ক্রিয় এবং একটি পজিট্রন নির্গত ক'রে ক্ষরিত হয়

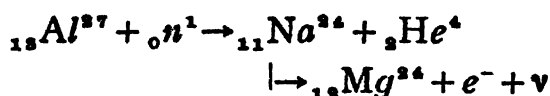
$$_{15}P^{30} \rightarrow _{14}S^{30} + e^{+} + \nu \qquad T_{\frac{1}{2}} = 2{\cdot}5 \text{ মিনিট}$$

এভাবেই পরীক্ষাগারে প্রথম কৃত্রিম তেজস্ক্রিয় আইসোটোপ উৎপন্ন হয়। এই ঘটনাটি অত্যন্ত তাৎপর্য্যপূর্ণ কারণ এর আগে বিজ্ঞানীদের ধারণা ছিল যে কোন উপায়েই তেজস্ক্রিয়তা ধ্বংস করা, সৃষ্টি করা অথবা পরিবর্ত্তিত করা সম্ভব নয়, ক্যুরী এবং জোলিওর পরীক্ষায় প্রথম প্রমাণ হ'ল যে পদার্থের

ভিতর কৃত্রিম উপায়ে তেজস্ক্রিয়তা আরোপ করা সম্ভব। এরপর নানারকম বিক্রিয়ার দ্বারা কৃত্রিম উপায়ে বিপুলসংখ্যক তেজস্ক্রিয় আইসোটোপ উৎপাদন করা সম্ভব হয়েছে এবং বিজ্ঞান ও মানবকল্যাণে নানাভাবে এদের কাজে লাগান হয়েছে। ক্যুরী এবং জোলিও রাসায়নিক উপায়ে এ্যালুমিনিয়ামের ভিতর থেকে তেজস্ক্রিয় ফসফরাস পৃথক করতে সক্ষম হন এবং এর পজিট্রন তেজস্ক্রিয়তা নিশ্চিতভাবে প্রমাণ করেন। কৃত্রিম উপায়ে ত্বরিত অন্যান্য আহিত কণার সাহায্যেও তেজস্ক্রিয় আইসোটোপ সৃষ্টি করা যায়, দুটি উদাহরণ হ'ল

$$_{6}C^{12} + {_1}H^{2} \rightarrow {_7}N^{13} + {_0}n^{1}$$

$$_{6}C^{12} + {_1}H^{1} \rightarrow {_7}N^{13} + \gamma$$

$_7N^{13}$ কেন্দ্রীনটি তেজস্ক্রিয় ($T_{\frac{1}{2}} = 10 \cdot 1$ মি) এবং এটিও পজিট্রন নির্গমন ক'রে ক্ষরিত হয়। আহিত কণার আঘাতে যে নূতন কেন্দ্রীনের সৃষ্টি হয় তাদের ভিতর প্রোটনের অনুপাত স্থায়ী ঘাতবহ কেন্দ্রীনের তুলনায় বৃদ্ধি পায়, এজন্য এভাবে যেসব তেজস্ক্রিয় আইসোটোপগুলির সৃষ্টি হয় সেগুলি সাধারণতঃ পজিট্রন নির্গমন ক'রে থাকে। নিউট্রনের দ্বারা আঘাত ক'রে ইলেকট্রন নির্গমনকারী তেজস্ক্রিয় কেন্দ্রীন সৃষ্টি করা যায়। ফের্মি নিম্নলিখিত বিক্রিয়ার সাহায্যে তেজস্ক্রিয় Na^{24} আইসোটোপ ($T_{\frac{1}{2}} = 15$ঘ) প্রস্তুত করেন

$$_{13}Al^{27} + {_0}n^{1} \rightarrow {_{11}}Na^{24} + {_2}He^{4}$$

$$\quad\quad\quad\quad\quad\quad \mapsto {_{12}}Mg^{24} + e^{-} + \nu$$

নিউট্রন যেহেতু অতি সহজেই কেন্দ্রীনের সংস্পর্শে আসতে পারে, এর দ্বারা কৃত্রিম তেজস্ক্রিয়তা সৃষ্টি করা অপেক্ষাকৃত অনেক সহজ এবং পর্য্যায়-সারণীর সমস্ত মৌলেরই তেজস্ক্রিয় আইসোটোপ নিউট্রনের বিক্রিয়ার দ্বারা গঠন করা যায়।

কেন্দ্রীনঘটিত বিক্রিয়ার প্রস্থচ্ছেদ (Cross-section)

সমস্তরকম কেন্দ্রীনঘটিত বিক্রিয়া একই হারে ঘটে না, বিভিন্ন বিক্রিয়া ঘটার হারের মধ্যে ব্যাপক পার্থক্য রয়েছে। আমরা বলি, কোন কোন বিক্রিয়া ঘটার সম্ভাবনা অধিক এবং কোন কোন বিক্রিয়া ঘটার সম্ভাবনা অপেক্ষাকৃত কম। একটি বিক্রিয়া ঘটার মোট হার পরীক্ষাধীন নানারকম অবস্থার উপর নির্ভর করে যাদের সঙ্গে কেন্দ্রীনের পরিক্রিয়ার কোন সংস্রব নেই। সুতরাং যদি ঐসব পরীক্ষাধীন অবস্থাগুলির প্রভাব বিভিন্ন বিক্রিয়ার ক্ষেত্রে পৃথক ক'রে ফেলা যায়

তবেই আমরা ঐসব বিক্রিয়াগুলির বিশুদ্ধ সম্ভাব্যতার বিষয় জানতে পারি যা শুধু বিক্রিয়ার অংশগ্রহণকারী কণা ও কেন্দ্রীনের পারিক্রিয়ার উপর নির্ভর করবে। এইভাবে যে রাশিটি পাওয়া যায় তাকে বলা হয় বিক্রিয়ার প্রস্থচ্ছেদ। বিভিন্ন বিক্রিয়ার ক্ষেত্রে এর পরিমাণ বিভিন্ন কিন্তু একটি নির্দিষ্ট বিক্রিয়ার জন্য এটি একটি নির্দিষ্ট রাশি, যদিও প্রস্থচ্ছেদের পরিমাণ সাধারণতঃ আপতিত কণাগুলির শক্তির উপর নির্ভরশীল। পরীক্ষার দ্বারা বিভিন্ন বিক্রিয়ার প্রস্থচ্ছেদ মাপা যায়।

প্রস্থচ্ছেদের সংজ্ঞা দিতে হলে প্রথমে কোন একটি বিক্রিয়ার সাহায্যে ব্যাখ্যা করা সুবিধাজনক, ধরা যাক নিম্নলিখিত সাধারণ বিক্রিয়াটি

$$x+X \rightarrow y+Y \qquad \cdots \qquad 10{\cdot}9$$

X বলতে বোঝায় কোন একটি আইসোটোপ এবং x হ'ল সচরাচর নিউট্রন, প্রোটন, আলফাকণা, আলোককণা, ইত্যাদি। X কেন্দ্রীনের ঘাতবহ সাধারণতঃ খুব স্বল্প বেধসমন্বিত পাত বা প্রলেপের আকারে প্রস্তুত করা হয়, তাছাড়া তরল কিংবা গ্যাসীয় আকারেও ঘাতবহ ব্যবহৃত হয় (যেমন বুদ্‌বুদকক্ষ অথবা মেঘকক্ষের ভিতর)। Y এবং y হ'ল যথাক্রমে বিক্রিয়ার ফলে উৎপন্ন দুটি বিভিন্ন কেন্দ্রীন, কিংবা একটি কেন্দ্রীন ও একটি হাল্কা কণা, ইত্যাদি; দুইয়ের অধিকসংখ্যক কণা যদি বিক্রিয়ার ফলে উৎপন্ন হয় তাহলেও প্রদত্ত সংজ্ঞার কোন পরিবর্তন প্রয়োজন হবে না।

ধরা যাক, X ঘাতবহের উপর প্রতি বর্গ সেণ্টিমিটারে প্রতি সেকেণ্ডে N_i সংখ্যক কণা আপতিত হচ্ছে এবং এদের মধ্যে N_f সংখ্যক কণা বিক্রিয়াতে অংশগ্রহণ করছে, অর্থাৎ N_f সংখ্যক Y বা y কণার সৃষ্টি হচ্ছে। সুতরাং অনুপাত N_f/N_i হ'ল বিক্রিয়াটি কি হারে ঘটছে তার একটা পরিমাপ। এই অনুপাত নির্ভর করবে পরীক্ষাধীন নানারকম অবস্থা বা সর্তের উপর, যেমন বিক্রিয়ার হার নির্ভর করে প্রতি একক ঘনায়তনে পরমাণু-কেন্দ্রীনের সংখ্যা কত তার উপর এবং ঘাতবহের ভিতর আপতিত কণা যতটা দূরত্ব অতিক্রম করে তার উপর। যদি এই নির্ভরশীলতা সরল অনুপাতে হয়ে থাকে তাহলে আমরা লিখতে পারি,

$$\frac{N_f}{N_i}=\sigma N t \qquad \cdots \qquad 10{\cdot}10$$

এখানে N, ঘাতবহের ভিতর প্রতি ঘন সেণ্টিমিটারে কেন্দ্রীনের সংখ্যা, t ঘাতবহের বেধ এবং σ একটি ধ্রুবক। এই σ ধ্রুবকটিকেই বলা হয় বিক্রিয়ার

প্রস্থচ্ছেদ। 10·10 সম্বন্ধে ডানপাশের রাশিটি দুইটি অংশে বিভক্ত, একটি অংশ Nt, ঘনত্ব ও বেধের গুণফল অর্থাৎ কণাপ্রবাহের গতিপথে প্রতি বর্গ সেণ্টিমিটারে কেন্দ্রীনের মোট সংখ্যা, অপর অংশ σ শুধু বিক্রিয়াশীল কণা ও কেন্দ্রীনের মধ্যে পরিক্রিয়ার প্রকৃতির উপর নির্ভরশীল। বলাই বাহুল্য, বিভিন্ন বিক্রিয়ার জন্য σ বিভিন্ন এবং এর পরিমাণ থেকে কেন্দ্রীনের বলগুলির প্রকৃতি সম্বন্ধে এবং কেন্দ্রীনের গঠন সম্বন্ধে নানাভাবে জ্ঞানলাভ করা যায়। σ অবশ্য সাধারণতঃ ভরকেন্দ্রের পরিপ্রেক্ষিতে বিক্রিয়াশীল কণাদ্বয়ের মোট গতিশক্তির উপর নির্ভরশীল এবং গতিশক্তির অপেক্ষক হিসাবে σ মাপা হয়ে থাকে। পরীক্ষায় N_i, N_f, N এবং t মাপা যায় এবং তাথেকে σ নির্দ্ধারিত হয়। 10·10 সূত্র থেকে আমরা দেখি যে σ-র মাত্রা হ'ল ক্ষেত্রফলের, এজন্যই একে বলা হয় প্রস্থচ্ছেদ। কল্পনা করা যেতে পারে যে প্রতিটি কেন্দ্রীনের সঙ্গে σ পরিমাণের ক্ষেত্রফল সংশ্লিষ্ট আছে যার ভিতর আঘাত হলেই একটি বিক্রিয়া ঘটবে। এভাবে বিচার করলেও 10·10 সম্বন্ধটি মোট বিক্রিয়ার সংখ্যা যথার্থ-ভাবে নির্দেশ করে। σ-র পরিমাণ যদি শূন্য হয় তবে সমস্ত আপতিত কণাই কোন বিক্রিয়া না ঘটিয়ে ঘাতবহের ভিতর দিয়ে বেরিয়ে আসবে। অবশ্য কেন্দ্রীনের বাস্তব আয়তন এবং এই প্রস্থচ্ছেদের পরিমাণের মধ্যে বাস্তবিক-পক্ষে কোন সম্পর্ক নেই। σ প্রস্থচ্ছেদের এককে মাপা হয় এবং এর জন্য যে একক নির্দেশ করা হয়েছে তাকে বলা হয় বার্ন (barn)।

$$1 \text{ বার্ন} = 10^{-24} \text{ বর্গ সেণ্টিমিটার}$$

একটি কণা একই ঘাতবহের উপর নানারকম বিক্রিয়ার জন্ম দিতে পারে। যেমন ধরা যাক ইউরেনিয়ামের সঙ্গে খুব স্বল্পশক্তিসম্পন্ন নিউট্রনের বিক্রিয়া, এর ফলে ইউরেনিয়াম কেন্দ্রীন ভেঙ্গে দু'টুকরো হয়ে গিয়ে দুটি বিভিন্ন কেন্দ্রীনের সৃষ্টি হতে পারে যাদের উভয়ের ভরসংখ্যা ইউরেনিয়ামের ভরসংখ্যার অর্দ্ধেকের নিকটবর্ত্তী, এই বিক্রিয়াকে বলা হয় ইউরেনিয়ামের বিদারণ। এছাড়া নিউট্রনটি ইউরেনিয়ামের ভিতর শোষিত হয়ে গিয়ে এর একটি নূতন আইসোটোপ সৃষ্টি করতে পারে, একে বলা হয় নিউট্রন-আহরণ-বিক্রিয়া; আবার নিউট্রন সাধারণ সংঘর্ষের দ্বারা ইউরেনিয়াম কেন্দ্রীনে শুধু কিছু ভরবেগ সঞ্চার করতে পারে, একে বলা হয় স্থিতিস্থাপক সংঘর্ষ। এই তিন রকমের বিক্রিয়া ঘটার সম্ভাব্যতার মধ্যে ব্যতিক্রম আছে এজন্য এদের প্রস্থচ্ছেদও বিভিন্ন, মোট প্রস্থচ্ছেদ বলতে বোঝায় বিভিন্ন রকমের বিক্রিয়ার প্রস্থচ্ছেদের যোগফল

$$\sigma_{\text{মোট}} = \sigma_e + \sigma_f + \sigma_s \qquad \cdots \qquad 10{\cdot}11$$

এখানে σ_c → আহরণ বিক্রিয়ার প্রস্থচ্ছেদ

σ_f → বিদারণ বিক্রিয়ার প্রস্থচ্ছেদ

σ_s → স্থিতিস্থাপক সংঘর্ষের প্রস্থচ্ছেদ

এই প্রতিটি প্রস্থচ্ছেদই পরীক্ষায় পৃথক পৃথক ভাবে মাপা যায়। প্রস্থচ্ছেদের তাৎপর্য্য ইউরেনিয়ামের এই বিক্রিয়াগুলির দ্বারা বিশেষভাবে বোঝা যাবে কারণ এক্ষেত্রে 10.10 সূত্রের 'Nt' গুণফলের পরিমাণ অভিন্ন কিন্তু ভিন্ন ভিন্ন বিক্রিয়া ভিন্ন ভিন্ন হারে ঘটছে যেহেতু এদের প্রস্থচ্ছেদের পরিমাণ পরস্পর পৃথক।

কেন্দ্রীনঘটিত বিক্রিয়ায় শক্তি ও ভরবেগ সংরক্ষণ নীতি

আমরা আলফা ও বিটা ক্ষরণের ক্ষেত্রে শক্তিসংরক্ষণ নীতি প্রয়োগ ক'রে ঐসব ক্ষরণের Q-পরিমাণ নির্দ্ধারণ করেছি। কেন্দ্রীনঘটিত বিক্রিয়ার ক্ষেত্রেও একইভাবে Q-পরিমাণ নির্দ্ধারণ করা যায়, এক্ষেত্রেও সাধারণভাবে একটি বিক্রিয়াকে আমরা নিম্নলিখিতভাবে উপস্থাপিত করি

$$x + X \rightarrow y + Y$$

যেমন পূর্ব্বেই বলা হয়েছে যদি $x = y$ এবং $X = Y$ হয় এবং কণাগুলির ভিতর ভরবেগ সঞ্চারণ ভিন্ন আর কোনরকম ক্রিয়া না ঘটে, তাহলে এই ধরণের বিক্রিয়াকে বলা হয় স্থিতিস্থাপক সংঘর্ষ। অস্থিতিস্থাপক সংঘর্ষেও $x = y$ এবং $X = Y$ হতে পারে কিন্তু সেক্ষেত্রে B কেন্দ্রীনটি সংঘর্ষের পর একটি উত্তেজিত শক্তিস্তরে উপনীত হয় এবং সচরাচর এটি গামারশ্মি বিকিরণ ক'রে ভূমিস্তরে চলে আসে। তবে সাধারণতঃ বিক্রিয়াপূর্ব্ব এবং বিক্রিয়ান্তর কণাগুলি পরস্পরের থেকে পৃথক। একটি বিক্রিয়ার জন্য শক্তিসংরক্ষণ নীতিটি নিম্নলিখিত উপায়ে লেখা যায়

$$m_x c^2 + M_X c^2 + T_x = m_y c^2 + M_Y c^2 + T_Y + T_y$$

এখানে M_Y, m_y ইত্যাদি হ'ল উক্তনামীয় কণাগুলির ভর এবং T_Y, T_y ইত্যাদি এদের গতিশক্তি। Q-পরিমাণ হ'ল এই বিক্রিয়ার মোট নিঃসারিত শক্তির পরিমাণ

$$\begin{aligned} Q &= T_Y + T_y - T_x \\ &= (m_x + M_X - m_y - M_Y)c^2 \quad \cdots \quad 10.12 \end{aligned}$$

বিক্রিয়ার অংশগ্রহণকারী কণাগুলির ভরের উপর নির্ভর ক'রে Q-পরিমাণ ধনরাশি, ঋণরাশি কিংবা শূন্য হতে পারে কিন্তু প্রাথমিক বা প্রান্তিক কণাগুলির

গতিশক্তির উপর তা নির্ভরশীল নয়, অর্থাৎ একটি বিশেষ বিক্রিয়ার জন্য Q-পরিমাণ সম্পূর্ণরূপে নির্দিষ্ট। বিভিন্ন কণাগুলির ভরের পরিমাণ জানা থাকলেই 10·12 সম্বন্ধের দ্বারা Q-পরিমাণ নির্দ্ধারণ করা যায়, স্থিতিস্থাপক বিক্ষুরণের Q-পরিমাণ শূন্য। কোন কোন কেন্দ্রীনঘটিত বিক্রিয়ার Q-পরিমাণ অত্যধিক হতে পারে, উদাহরণ হিসাবে কক্‌ক্রফ্‌ট এবং ওয়ালটন আবিষ্কৃত 10·2 বিক্রিয়াটির কথা ধরা যাক; 0·5 এমইভি প্রোটনের দ্বারা যে দুটি আলফাকণা সৃষ্টি হয় তাদের প্রত্যেকের গতিশক্তি 8·9 এমইভি, সুতরাং এক্ষেত্রে Q-পরিমাণ

$$Q = 17{\cdot}8 - 0{\cdot}5 = 17{\cdot}3 \text{ এমইভি}$$

ঠিক একই পরিমাণ পাওয়া যায় যদি আমরা কণাগুলির ভর বিবেচনা করি

$$\begin{aligned} Q &= (M_{Li}{}^7 + M_p - M_{He}{}^4 - M_{He}{}^4)c^2 \\ &= (7{\cdot}016 + 1{\cdot}0072 - 8{\cdot}0052) \text{ এএমইউ} \\ &= 17{\cdot}32 \text{ এমইভি} \end{aligned}$$

যেসব বিক্রিয়ার Q-পরিমাণ ধনরাশি এবং অত্যধিক ভবিষ্যতে পারমাণবিক শক্তি উৎপাদনে সেগুলির প্রয়োগের সম্ভাবনা রয়েছে। উপরের উদাহরণে যদি x একটি গামারশ্মি আলোককণা হয় তাহলে বিক্রিয়াটিকে বলা হয় আলোক-কেন্দ্রীন বিক্রিয়া, যদি x একটি কণা এবং y গামারশ্মি হয় তাহলে ঐ ধরণের বিক্রিয়াকে বলা হয় বিকিরণাত্মক আহরণ, এইসব বিক্রিয়ার ক্ষেত্রেও শক্তি-সংরক্ষণ নীতি প্রয়োগ ক'রে একই উপায়ে Q-পরিমাণ নির্দ্ধারণ করা যায়।

কেন্দ্রীনঘটিত বিক্রিয়ায় মোট ভরবেগ সংরক্ষিত হয় এবং ভরবেগ সংরক্ষণের নীতি প্রয়োগ ক'রেও Q-পরিমাণ নির্ণয়ের একটি সহজ সূত্র আবিষ্কার করা যায়। আমাদের পূর্ব্ববর্ত্তী বিক্রিয়াটির কথাই ধরা যাক; আমরা যদি আপতিত কণাটির গতিপথের দিকে ভরবেগের উপাংশের সংরক্ষণ বিবেচনা করি তাহলে নিম্নলিখিত সমীকরণটি পাই (10·3 চিত্র),

$$\sqrt{m_x T_x} = \sqrt{m_y T_y} \cos\theta + \sqrt{M_Y T_Y} \cos\phi \quad \cdots \quad 10{\cdot}13$$

চিত্র 10·3

স্পষ্টতাই x, y, এবং Y কণাত্রয়ের ভরবেগ ভেক্টর একই সমতলে থাকে,

আপতিত কণার গতিপথের সঙ্গে লম্বভাবে ভরবেগের যে উপাংশ থাকে সেগুলির সংরক্ষণ বিবেচনা করলে আমরা পাই

$$0=\sqrt{m_y T_y}\sin\theta-\sqrt{M_Y T_Y}\sin\phi \quad \cdots \quad 10.14$$

উপরোক্ত সমীকরণদ্বয়ের ক্ষেত্রে সাধারণ নিউটনীয় বলবিজ্ঞানের নীতি প্রয়োগ করা হয়েছে, অধিকাংশ কেন্দ্রীনঘটিত বিক্রিয়াই যেসব শক্তিতে ঘটে তাতে বিভিন্ন গতিবেগের পরিমাণ আলোর গতিবেগের তুলনায় যথেষ্ট কম থাকে, এজন্য আপেক্ষিকতাতত্ত্বের প্রয়োগের প্রয়োজন হয় না। 10.13 ও 10.14 সমীকরণদ্বয়কে পক্ষান্তর ক'রে তারপর বর্গ নিলে দাঁড়ায়

$$M_Y T_Y \cos^2\phi = m_x T_x + m_y T_y \cos^2\theta - 2\sqrt{m_x T_x m_y T_y}\cos\theta$$

$$M_Y T_Y \sin^2\phi = m_y T_y \sin^2\theta$$

এবং এথেকে পরিশেষে আমরা পাই,

$$T_Y=\frac{m_x}{M_Y}T_x+\frac{m_y}{M_Y}\cdot T_y-\frac{2\sqrt{m_x T_x m_y T_y}}{M_Y}\cos\theta \quad \cdots \quad 10.15$$

এই সম্বন্ধটিকে 10.12 সমীকরণে প্রয়োগ করলে আমরা পাই

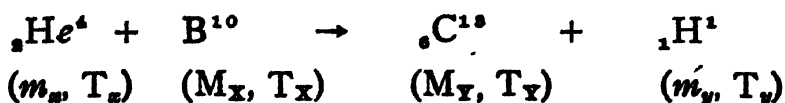
$$Q=T_y+T_Y-T_x=T_y\left(1+\frac{m_y}{M_Y}\right)-T_x\left(1-\frac{m_x}{M_Y}\right)-\frac{2\sqrt{m_x T_x m_y T_y}}{M_Y}\cos\theta \quad \cdots \quad 10.16$$

এই প্রকাশনটি থেকে আমরা Q-পরিমাণ নির্ণয় করতে পারি, যদি T_x, T_Y, m_x, m_y এবং M_Y-এর পরিমাণ জানা থাকে। তবে বিভিন্ন ভরগুলি এই সূত্রে অনুপাতের আকারে আবির্ভূত হয় এজন্য এদের প্রকৃত ভরের বদলে ভরসংখ্যা ব্যবহার করলে ভুলের পরিমাণ খুব সামান্যই হবে। পরীক্ষায় সাধারণতঃ আপতন দিকের সঙ্গে 90° কোণে T_y পরিমাপ করা হয়, সেক্ষেত্রে 10.16 প্রকাশনের বাঁদিকের সর্বশেষ রাশিটি শূন্য হয়ে যাওয়াতে প্রকাশনটি অপেক্ষাকৃত সরলতর হয়।

উদাহরণ : $B^{10}(\alpha, p)C^{13}$ বিক্রিয়াটির Q-পরিমাণ 4 এমইভি; যদি আঘাতকারী আলফাকণার শক্তি হয় 5 এমইভি তবে যে প্রোটনগুলি আগন্তুক কণাপ্রবাহের সঙ্গে 0°, 90° এবং 180° কোণে উৎপন্ন হচ্ছে তাদের

শক্তি নির্ণয় কর। ধরে নেওয়া যেতে পারে যে $_6C^{13}$ কেন্দ্রীনটি বিক্রিয়ার পর ভূমিস্তরে উপনীত থাকে।

সমাধান : এক্ষেত্রে বিক্রিয়াটি হ'ল

$$_2He^4 + B^{10} \rightarrow {}_6C^{13} + {}_1H^1$$
$$(m_x, T_x) \quad (M_X, T_X) \quad (M_Y, T_Y) \quad (m_y, T_y)$$

এক্ষেত্রে m_x, T_x ইত্যাদি বিশেষ কণাটির ভর ও শক্তি নির্দেশ করে। প্রোটনের শক্তি নির্দ্ধারণের জন্য আমরা 10·16 সমীকরণটি ব্যবহার করতে পারি

$$4 = T_y(1 + A/13A) - 5(1 - 4A/13A)$$
$$\frac{8{\cdot}944\, T_y^{\frac{1}{2}}}{13} \cos\theta$$

এখানে $Q = 4$ এমইভি এবং $T_x = 5$ এমইভি মানদ্বয় ব্যবহার করা হয়েছে। A রাশিটি কেন্দ্রীনের ভরসংখ্যা নির্দেশ করে অর্থাৎ এখানে প্রতি ক্ষেত্রেই আমরা কণাগুলির ভর নির্দেশ করতে গিয়ে A-এর তুলনায় সামান্য কিছু এএমইউ পরিমাণ শক্তি অবহেলা করেছি।

যদি $\theta = 0$ হয়, তবে 10·16 সমীকরণটিকে সরলীকৃত করলে আমরা পাই

$$14(T_y^{\frac{1}{2}})^2 - 8{\cdot}944\, T_y^{\frac{1}{2}} - 97 = 0$$

সুতরাং $T_y^{\frac{1}{2}} = (8{\cdot}944 \pm 74{\cdot}25)/28 = 2{\cdot}96$

এই ধরণের গণনায় $T_y^{\frac{1}{2}}$-এর ঋণমান অথবা কাল্পনিক মানকে অগ্রাহ্য করতে হবে। সুতরাং প্রোটনের শক্তির জন্য আমরা পাই

$$T_y = 2{\cdot}96^2 = 8{\cdot}8 \text{ এমইভি}$$

যখন $\theta = 180°$, 10·16 সমীকরণটি দাঁড়ায়

$$14(T_y^{\frac{1}{2}})^2 + 8{\cdot}944 T_y^{\frac{1}{2}} - 97 = 0$$
$$T_y^{\frac{1}{2}} = 2{\cdot}332,\ T_y = 5{\cdot}44 \text{ এমইভি}$$

যখন $\theta = 90°$, $14T_y = 97$, $T_y = 6{\cdot}92$ এমইভি।

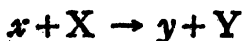
নিউট্রনঘটিত বিক্রিয়া

নিউট্রন যেহেতু কেন্দ্রীনের কুলম্ব প্রতিরোধ অনুভব করে না, এর পক্ষে কেন্দ্রীনের নিকটে আসা খুবই সহজ এবং এজন্য নিউট্রনঘটিত বিক্রিয়াগুলির প্রস্থচ্ছেদ সাধারণতঃ বেশী হয়। পরমাণুস্থ ইলেকট্রনের সঙ্গে নিউট্রনের বিশেষ কোন ক্রিয়া নেই, এর যা কিছু পারিক্রয়া তা শুধু পরমাণু কেন্দ্রীনের সঙ্গেই, এইসব কারণে নিউট্রন পদার্থের ভিতর সহজেই বহুদূর অন্তর্গমন করতে পারে। গতিবেগ হ্রাস পাবার সাথে সাথে নিউট্রনের দ্বারা ঘটিত কিছু কিছু বিক্রিয়ার সম্ভাবনা হ্রাস পেতে থাকে, এর কারণ স্বল্প গতিবেগসম্পন্ন নিউট্রন বেশীক্ষণ কেন্দ্রীনের নিকটে থাকতে পারে ব'লে কেন্দ্রীনের বলের সংস্পর্শে আসার সুযোগ এর বেশী। অধিক শক্তিবিশিষ্ট নিউট্রনের সঙ্গে কেন্দ্রীনের স্থিতিস্থাপক সংঘর্ষ ঘটে, এইসব সংঘর্ষের ফলে পদার্থের ভিতর নিউট্রনের শক্তিহ্রাস হয়। যেসব কেন্দ্রীনের ভরসংখ্যা খুব কম তাদের সঙ্গে সংঘর্ষে শক্তিক্ষয় হয় অনেক বেশী; উদাহরণস্বরূপ, একটি নিউট্রন হাইড্রোজেন কেন্দ্রীনের সঙ্গে এক সংঘর্ষে গড়ে প্রায় এর অর্দ্ধেক শক্তি ক্ষয় করে। তাছাড়া অস্থিতিস্থাপক সংঘর্ষও ঘটতে পারে, এসব সংঘর্ষের ফলেও নিউট্রনের শক্তি হ্রাস পায় এবং কেন্দ্রীনটি একটি উত্তেজিত শক্তিস্তরে উপনীত হয়।

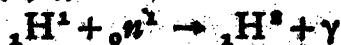
নিউট্রন-আহরণ-বিক্রিয়া ঘটে যখন সচরাচর শ্লথ অর্থাৎ খুব কম শক্তির নিউট্রন পরমাণুকেন্দ্রীনকে আঘাত করে, সেসব ক্ষেত্রে কেন্দ্রীনটি নিউট্রন আহরণ ক'রে একটি নূতন আইসোটোপে পরিণত হয়। এইভাবে উদ্ভূত নূতন কেন্দ্রীনটি সাধারণতঃ একটি উত্তেজিত শক্তিস্তরে থাকে এবং দ্রুত গামারশ্মি বিকিরণ ক'রে ভূমিস্তরে নেমে আসে, এইরকম একটি উদাহরণ হ'ল

$$Ag^{107} + n \rightarrow Ag^{108*} \rightarrow Ag^{108} + \gamma \quad \cdots \quad 10{\cdot}17$$

$$Ag^{108*} \rightarrow Cd^{108} + e^{-} + \nu$$

কেন্দ্রীনঘটিত বিক্রিয়াগুলিকে সহজে লেখার জন্য আমরা একটি সংক্ষিপ্ত নির্দেশক ব্যবহার করব। 10·9 বিক্রিয়াটি

$$x + X \rightarrow y + Y$$

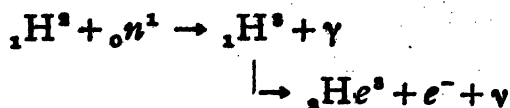
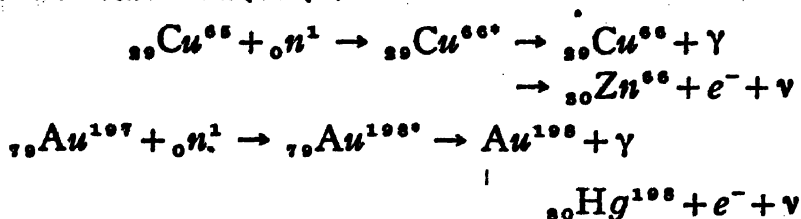
সংক্ষেপে বোঝাতে আমরা লিখব X (x, y) Y, এইভাবে 10·17 বিক্রিয়াটিকে লেখা যায় Ag^{107} (n, γ) Ag^{108}। এই নির্দেশকে বন্ধনীর মধ্যের দুটি সাধারণতঃ হাল্কা কণা এবং বাইরের দুটি ভারী কেন্দ্রীন। নিউট্রন-আহরণ-বিক্রিয়াকে অনেক সময় আরও সংক্ষেপে (n, γ) হিসাবেও লেখা হয়। সরলতম (n, γ) বিক্রিয়াটি হ'ল হাইড্রোজেনের শ্লথ নিউট্রন আহরণ

$${}_1H^1 + {}_0n^1 \rightarrow {}_1H^2 + \gamma$$

ডয়টেরনের মধ্যেও নিউট্রন আহরণ ঘটতে পারে এবং এর ফলে হাইড্রোজেনের তৃতীয় আইসোটোপ ট্রাইটিয়াম উৎপন্ন হয়

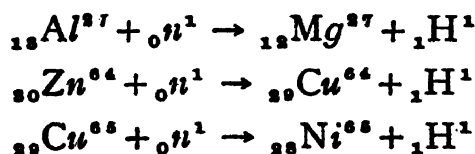
$$_1H^2 + {}_0n^1 \rightarrow {}_1H^3 + \gamma$$
$$\rightarrow {}_2He^3 + e^- + \nu$$

এরকম আরও কয়েকটি উদাহরণ হ'ল

$$_{29}Cu^{65} + {}_0n^1 \rightarrow {}_{29}Cu^{66*} \rightarrow {}_{29}Cu^{66} + \gamma$$
$$\rightarrow {}_{30}Zn^{66} + e^- + \nu$$

$$_{79}Au^{197} + {}_0n^1 \rightarrow {}_{79}Au^{198*} \rightarrow Au^{198} + \gamma$$
$${}_{80}Hg^{198} + e^- + \nu$$

(n, γ) বিক্রিয়ায় যে আইসোটোপগুলি উৎপন্ন হয় সেগুলি প্রায় সমস্তই তেজস্ক্রিয় এবং তেজস্ক্রিয় আইসোটোপ উৎপাদনের এটি একটি প্রকৃষ্ট উপায়।

আরেকধরণের বিক্রিয়া হ'ল (n, p) বিক্রিয়া, এই বিক্রিয়ায় কেন্দ্রীনের একটি প্রোটন নিউট্রনে পর্য্যবসিত হয়, ভরসংখ্যার কোন পরিবর্ত্তন হয় না কিন্তু আধান এক একক পরিমাণ হ্রাস পায়। কয়েকটি উদাহরণ হ'ল

$$_{13}Al^{27} + {}_0n^1 \rightarrow {}_{12}Mg^{27} + {}_1H^1$$
$$_{30}Zn^{64} + {}_0n^1 \rightarrow {}_{29}Cu^{64} + {}_1H^1$$
$$_{29}Cu^{65} + {}_0n^1 \rightarrow {}_{28}Ni^{65} + {}_1H^1$$

ভারী কেন্দ্রীনে এই বিক্রিয়া ঘটতে অধিক শক্তির নিউট্রনের প্রয়োজন হয়। একটি উল্লেখযোগ্য (n, p) বিক্রিয়া হ'ল

$$_7N^{14} + {}_0n^1 \rightarrow {}_6C^{14} + {}_1H^1$$

এর ফলে যে তেজস্ক্রিয় কার্ব্বন আইসোটোপটি উৎপন্ন হয় তার ক্ষরণ ঘটে নিম্নলিখিত উপায়ে

$$_6C^{14} \rightarrow {}_7N^{14} + e^- + \nu \qquad \text{অর্দ্ধজীবনকাল} = 5568 \text{ বছর}$$

বর্ত্তমানে নানারকম গবেষণায় তেজস্ক্রিয় C^{14} আইসোটোপ ব্যবহার করা হয় এবং উপরোক্ত বিক্রিয়ার সাহায্যেই এটি প্রস্তুত করা হয়ে থাকে। আরও উল্লেখযোগ্য যে প্রকৃতির ভিতরও এই বিক্রিয়াটি ঘটে, এজন্য যেসব পদার্থের ভিতর কার্ব্বন আছে তাদের মধ্যে এই আইসোটোপটির অস্তিত্ব দেখতে পাওয়া যায়। মহাজাগতিক রশ্মিকণাসমূহ বায়ুমণ্ডলে কিছু নিউট্রন উৎপন্ন করে এবং

ঐগুলি পরে নাইট্রোজেন কেন্দ্রীনকে আঘাত ক'রে উক্ত বিক্রিয়ার জন্ম দিয়ে থাকে। $_6C^{14}$ হ'ল অতি অল্পসংখ্যক তেজস্ক্রিয় আইসোটোপগুলির মধ্যে একটি যা প্রাকৃতিক প্রক্রিয়ায় প্রস্তুত হয় এবং এর অর্দ্ধজীবনকাল খুব বেশী ব'লে প্রকৃতির ভিতর যথেষ্ট পরিমাণে সঞ্চিত হতে পারে। বায়ুমণ্ডলের CO_2 গ্যাসের এক ক্ষুদ্র ভগ্নাংশ সবসময়ই এই আইসোটোপটির দ্বারা গঠিত। উদ্ভিদ বাতাসের ভিতর কার্বন ডাই-অক্সাইড সংগ্রহ করার সময় এই তেজস্ক্রিয় আইসোটোপটিও গ্রহণ করে এবং উদ্ভিদের শরীর থেকে এটি প্রাণিদেহে সঞ্চারিত হয়। কিন্তু মৃত্যুর পর উদ্ভিদ বা প্রাণিদেহে নূতন ক'রে এই আইসোটোপটি আর সঞ্চারিত হয় না। সুতরাং মৃত্যুকালীন জীবদেহে যে পরিমাণ C^{14} ছিল মৃত্যুর পর আস্তে আস্তে ক্ষরণের ফলে তা হ্রাস পেতে থাকে এবং 5568 বছর পর অর্দ্ধেকে পরিণত হয়। কোন সময়ে মৃত জীবদেহে তেজস্ক্রিয় কার্বন ও স্থায়ী কার্বনের অনুপাত জানা থাকলে কত পূর্বে এর মৃত্যু হয়েছিল তা গণনা করা সম্ভব। মৃত জীবদেহের তেজস্ক্রিয়তা পরিমাপ ক'রে C^{14}-এর অনুপাত নির্দ্ধারণ করা যায় এবং এভাবে 25,000 বছরের পুরনো জীবদেহের জীবৎকালের প্রকৃত সময় নির্দ্ধারণ করা সম্ভব হয়েছে। বিভিন্ন পুরাতাত্ত্বিক কাল নির্ণয়ের জন্য এই পদ্ধতির ব্যাপক প্রচলন আছে। কাল নির্ণয়ের আরও উপায় আছে, তেজস্ক্রিয় কার্বন পদ্ধতিতে প্রাপ্ত ফলাফল অন্যান্য পদ্ধতিতে প্রাপ্ত ফলাফলের সঙ্গে সম্পূর্ণ সামঞ্জস্যপূর্ণ।

নিউট্রনের আঘাতে বায়ুমণ্ডলে আরও একটি তেজস্ক্রিয় আইসোটোপ সামান্য পরিমাণে উৎপন্ন হয়, এটি হ'ল হাইড্রোজেনের আইসোটোপ ট্রাইটিয়াম, এর অর্দ্ধজীবনকাল 12·3 বছর

$$_7N^{14} + {_0n^1} \rightarrow {_6C^{12}} + {_1H^3}$$

এই কারণে জলের মধ্যে অতি সামান্য পরিমাণে ট্রাইটিয়ামের অস্তিত্ব লক্ষ্য করা যায়, পরীক্ষার সাহায্যে প্রাপ্ত পরিমাণ হ'ল মোটের 3×10^{-18} অংশ মাত্র।

ইউরেনিয়ামপারের মৌল (Transuranic element)

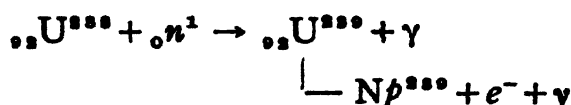
প্রকৃতির ভিতর 92টি মৌল আছে এই তথ্য বহুকাল থেকেই জ্ঞাত। কেন্দ্রীনঘটিত বিক্রিয়াগুলি আবিষ্কৃত হবার পর থেকে বিজ্ঞানীরা চেষ্টা করতে লাগলেন এইসব বিক্রিয়ার সাহায্যে $Z > 92$ পারমাণবিক সংখ্যাবিশিষ্ট মৌলগুলি কৃত্রিম উপায়ে প্রস্তুত করা যায় কিনা। তাঁদের এই চেষ্টা সফল হয়েছে এবং বর্তমানে $Z = 104$ পর্যন্ত মৌলগুলি পরীক্ষাগারে কৃত্রিম উপায়ে প্রস্তুত করা সম্ভব হয়েছে (পরিশিষ্টের সারণী দ্রষ্টব্য)। সাধারণতঃ নিউট্রন

কিংবা আল্ফাকণা বর্ষণের দ্বারা এই কেন্দ্রীনগুলি উৎপন্ন করা হয়, বর্তমানে কিন্তু ভারী আয়ন যেমন ত্বরিত C^{12} কেন্দ্রীনকে এই কাজে ব্যবহার করা হচ্ছে। পারমাণবিক সংখ্যা পরস্পর পৃথক ব'লে রাসায়নিক উপায়ে এইসব কৃত্রিম মৌলগুলিকে পৃথক করা যায়, কিন্তু এরা সাধারণতঃ উৎপন্ন হয় অতি অল্প পরিমাণে (10^{-6} গ্রাম) এজন্য এদের পৃথক করতে অতি জটিল রাসায়নিক প্রক্রিয়ার সাহায্য নিতে হয়, এইখানেই হ'ল ইউরেনিয়ামপারের পরমাণু সৃষ্টির জটিলতা। কয়েকটি ইউরেনিয়ামপারের মৌলের প্রস্তুতিকরণ পদ্ধতির সংক্ষিপ্ত বিবরণ নিম্নে দেওয়া হ'ল।

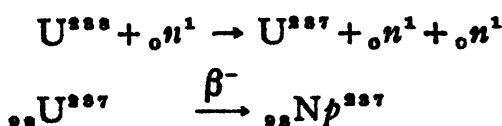
নেপচুনিয়াম ও প্লুটোনিয়াম :

নেপচুনিয়াম ইউরেনিয়ামের ঠিক পরেই, এর পারমাণবিক সংখ্যা 93। নেপচুনিয়ামের অনেকগুলি আইসোটোপের মধ্যে প্রথম আবিষ্কৃত হয় ${}_{93}Np^{239}$, নিম্নলিখিত বিক্রিয়ার মাধ্যমে

$${}_{92}U^{238} + {}_{0}n^{1} \rightarrow {}_{92}U^{239} + \gamma$$

$$\hookrightarrow Np^{239} + e^{-} + \nu$$

এই আইসোটোপটির অর্দ্ধজীবনকাল মাত্র 2·3 দিন, বিটা ক্ষরণের দ্বারা এটি প্লুটোনিয়ামে রূপান্তরিত হয়। নেপচুনিয়ামের আরেকটি উল্লেখযোগ্য আইসোটোপ হ'ল ${}_{93}Np^{237}$, এর অর্দ্ধজীবনকাল $2{\cdot}2 \times 10^{6}$ বছর এজন্য এটি বিশুদ্ধ রাসায়নিক মৌল হিসাবে যথেষ্ট পরিমাণে সংগ্রহ করা সম্ভব হয়েছে। এটি প্রস্তুত করা যায় U^{238}-কে শক্তিশালী নিউট্রনের দ্বারা আঘাত ক'রে

$$U^{238} + {}_{0}n^{1} \rightarrow U^{237} + {}_{0}n^{1} + {}_{0}n^{1}$$

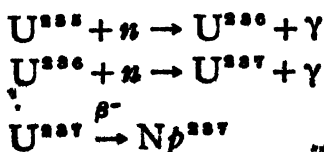
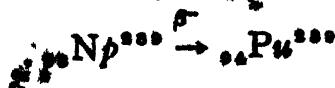
$${}_{92}U^{237} \xrightarrow{\beta^{-}} {}_{93}Np^{237}$$

এই আইসোটোপটি 4·78 এমইভি আলফাকণা ক্ষরণ করে। আধুনিক কোন কোন ধরণের পারমাণবিক চুল্লীর ভিতরও এটি উৎপন্ন হয়। এই আইসোটোপ উৎপাদনের অপর একটি উপায় হ'ল নিম্নলিখিত বিক্রিয়াসমষ্টি

$$U^{235} + n \rightarrow U^{236} + \gamma$$

$$U^{236} + n \rightarrow U^{237} + \gamma$$

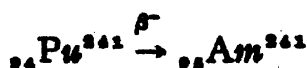
$$U^{237} \xrightarrow{\beta^{-}} Np^{237}$$

${}_{93}N_{p}^{239}$ কেন্দ্রীনের বিটা ক্ষরণে প্লুটোনিয়াম উৎপন্ন হয়

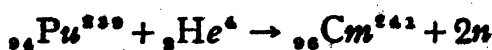
$${}_{93}Np^{239} \xrightarrow{\beta^{-}} {}_{94}Pu^{239}$$

এর অর্দ্ধজীবনকাল 24,360 বছর। প্লুটোনিয়ামের এই আইসোটোপটি সর্বাপেক্ষা উল্লেখযোগ্য কারণ বর্তমানে পারমাণবিক চুল্লীর সাহায্যে এটি বিপুল পরিমাণে উৎপন্ন করা যায়। তাছাড়া এই আইসোটোপটি বিদারণক্ষম এবং এর অর্দ্ধজীবনকাল যথেষ্ট ব'লে পারমাণবিক চুল্লী নির্মাণে এটি জ্বালানী হিসাবে ব্যবহৃত হয়, এটির সম্বন্ধে পরবর্তী অধ্যায়ে আরও আলোচনা করা হবে। ইউরেনিয়াম খনিজের ভিতর অতি সামান্য পরিমাণে প্লুটোনিয়ামের অস্তিত্ব থাকে।

আমেরিসিয়াম এবং ক্যুরিয়াম :

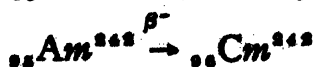
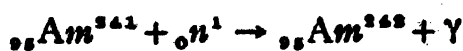
$_{95}Am^{241}$ আইসোটোপটি উৎপন্ন হয় প্লুটোনিয়াম আইসোটোপ Pu^{241}-এর বিটাক্ষরণের ফলে

$$_{94}Pu^{241} \xrightarrow{\beta^-} {}_{95}Am^{241}$$

প্লুটোনিয়ামের ঐ আইসোটোপটি U^{238}-এর উপর আলফা কণা অথবা নিউট্রন বর্ষণ ক'রে সৃষ্টি করা যায়। এছাড়া প্লুটোনিয়ামকে ডয়টেরনের সাহায্যে আঘাত ক'রেও আমেরিসিয়াম আইসোটোপ উৎপন্ন করা যায়। $_{95}Am^{241}$ আইসোটোপের অর্দ্ধজীবনকাল 470 বছর।

প্লুটোনিয়ামকে আলফাকণার দ্বারা আঘাত করলে ক্যুরিয়াম মৌলটি উৎপন্ন হয়

$$_{94}Pu^{239} + {}_{2}He^{4} \rightarrow {}_{96}Cm^{242} + 2n$$

এই আইসোটোপটি আলফাক্ষরণশীল, এর অর্দ্ধজীবনকাল 35 দিন। আমেরিসিয়ামকে নিউট্রনের দ্বারা আঘাত ক'রেও ক্যুরিয়াম উৎপন্ন করা সম্ভব

$$_{95}Am^{241} + {}_{0}n^{1} \rightarrow {}_{95}Am^{242} + \gamma$$

$$_{95}Am^{242} \xrightarrow{\beta^-} {}_{96}Cm^{242}$$

অন্যান্য ইউরেনিয়ামপারের মৌল

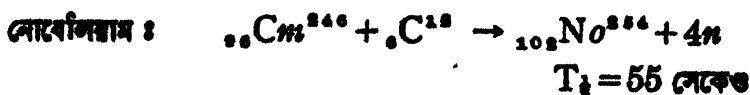
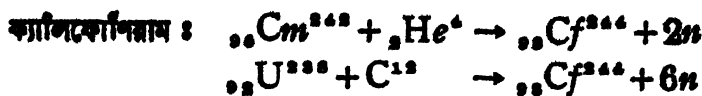
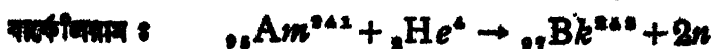
আরও উচ্চতর পারমাণবিক সংখ্যাবিশিষ্ট আইসোটোপ উৎপাদনের সাধারণ পদ্ধতি হ'ল একের পর এক উচ্চতর পারমাণবিক সংখ্যার কেন্দ্রীনকে আলফা-কণা, অথবা C^{12} অথবা O^{16} আয়নের দ্বারা আঘাত ক'রে যাওয়া এবং সৃষ্ট মৌলগুলিকে রাসায়নিক পদ্ধতিতে পৃথক করা। বলাই বাহুল্য যে এসব মৌলগুলি উৎপন্ন হয় অতি সামান্য পরিমাণে এবং এদের আইসোটোপগুলি সাধারণতঃ স্বল্পকাল স্থায়ী হয়; পরপৃষ্ঠায় এদের কয়েকটি দিয়ে দেওয়া গেল।

বার্কেলিয়াম : $_{95}Am^{241} + _{2}He^{4} \rightarrow _{97}Bk^{243} + 2n$

ক্যালিফোর্ণিয়াম : $_{96}Cm^{242} + _{2}He^{4} \rightarrow _{98}Cf^{244} + 2n$

$_{92}U^{238} + C^{12} \rightarrow _{98}Cf^{244} + 6n$

নোবেলিয়াম : $_{96}Cm^{246} + _{6}C^{12} \rightarrow _{102}No^{254} + 4n$

$T_{\frac{1}{2}} = 55$ সেকেণ্ড

ফের্মিয়াম : নোবেলিয়ামের আলফা ক্ষরণের ফলে ফের্মিয়াম উৎপন্ন হয়, এর আইসোটোপটির অর্দ্ধজীবনকাল 30 মিনিট

$$N_{o}^{254} \rightarrow _{100}Fm^{250} + _{2}He^{4}$$

অপর একটি বিক্রিয়া হ'ল

$$_{92}U^{238} + _{8}O^{16} \rightarrow _{100}Fm^{250} + 4n$$

অন্যান্য ইউরেনিয়ামপারের মৌলগুলি একই ধরণের পদ্ধতিতে উৎপন্ন করা যায়। একমাত্র প্লুটোনিয়াম ভিন্ন আর কোনটির বিশেষ কোন ব্যবহার নেই এবং এইসব আইসোটোপগুলির উৎপাদন অত্যন্ত ব্যয়সাধ্য। তবে বিজ্ঞানীদের এইদিকে খুবই ঔৎসুক্য রয়েছে এবং নূতন নূতন মৌল সৃষ্টির জন্য নানা দেশে প্রচেষ্টা চলছে। পারমাণবিক বোমার বিস্ফোরণের পর যে ভস্ম পড়ে থাকে তার মধ্যে ইউরেনিয়ামপারের অনেক আইসোটোপ সামান্য পরিমাণে উপস্থিত থাকে, আইনস্টাইনিয়াম ($Z=99$) এবং ফের্মিয়াম মৌলদ্বয় এই ভস্মের মধ্য থেকেই প্রথম আবিষ্কৃত হয়।

যৌগকেন্দ্রীন (Compound Nucleus) প্রকল্প

বিভিন্ন প্রকারের কেন্দ্রীনঘটিত বিক্রিয়া পর্য্যালোচনা করার জন্য যৌগকেন্দ্রীন প্রকল্পের অবতারণা করা হয়েছে। এই প্রকল্প অনুসারে কেন্দ্রীনঘটিত বিক্রিয়া ঘটে নিম্নলিখিত উপায়ে ; প্রথমে ঘাতবহ কেন্দ্রীনটি আপতিত কণাকে শোষণ ক'রে একটি যৌগকেন্দ্রীনে পরিণত হয় এবং অতি অল্পকালের মধ্যেই ঐ যৌগকেন্দ্রীনটি পুনরায় ক্ষরিত হয়। যদি এভাবে প্রস্তুত যৌগকেন্দ্রীনটি থেকে পুনরায় শুধুমাত্র আপতিত কণাটিই ক্ষরিত হয়ে ফিরে আসে এবং ঘাতবহ কেন্দ্রীনটি এর ভূমিস্তরে ফিরে যায় তাহলে সমগ্র বিক্রিয়াটিকে বলা যেতে পারে স্থিতিস্থাপক বিক্ষেপণ, যদি যৌগকেন্দ্রীনের ভিতর থেকে শুধু গামারশ্মি বিকিরিত হয় তখন এটি হয় আহরণ বিক্রিয়া, ইত্যাদি। যৌগকেন্দ্রীনের স্থায়িত্বকাল অবশ্য খুবই সামান্য, গড় আ প্রায় 10^{-14} সেকেণ্ড, কিন্তু একটি দ্রুতগতির

নিউট্রন বা প্রোটন কেন্দ্রীনের ব্যাস অতিক্রম করতে সময় নেয় মাত্র প্রায় 10^{-21} সেকেণ্ড এবং ঐই সময়ের তুলনায় যৌগকেন্দ্রীনের স্থায়িত্বকাল যথেষ্ট অধিক। সুতরাং যৌগকেন্দ্রীনের এই স্বল্প স্থায়িত্বকালের মধ্যেই শোষিত নিউট্রনটির সঙ্গে কেন্দ্রকণাগুলির বহুসংখ্যক সংঘর্ষ ঘটে এবং যেভাবে যৌগকেন্দ্রীনটি সৃষ্টি হয়েছিল সেই "স্মৃতি" আর কেন্দ্রকণাগুলির মধ্যে অবশিষ্ট থাকে না। অর্থাৎ যৌগকেন্দ্রীনের সৃজনের ধরণ এবং এর ক্ষরণের ধরণ একে অন্যের সম্পূর্ণ নিরপেক্ষ। সৃষ্ট যৌগকেন্দ্রীনটির ভিতর সাধারণতঃ বহুসংখ্যক কোয়াণ্টাম শক্তিস্তরের অস্তিত্ব থাকে, যদি আপাতিত নিউট্রনের শক্তি এমন হয় যাতে সৃষ্ট যৌগকেন্দ্রীনটি এর একটি বিশেষ কোয়াণ্টাম শক্তিস্তরে উপনীত হয় তাহলে বিক্রিয়া ঘটার সম্ভাবনা দ্রুত বৃদ্ধি পায়। এই অবস্থায় বিক্রিয়াটিকে বলা হয় অনুরণন বিক্রিয়া (resonance reaction)। এই ধরণের প্রক্রিয়া পরমাণুর বর্ণালীর ক্ষেত্রেও লক্ষ্য করা যায়, যদি পরমাণুর ভিতর বিভিন্ন প্রকার আলোর শোষণ লক্ষ্য করা যায় তাহলে দেখা যাবে যে যেসব তরঙ্গদৈর্ঘ্যে শোষণের ফলে পরমাণুটি এর কোন একটি উত্তেজিত শক্তিস্তরে উপনীত হয় সেইসব ক্ষেত্রে শোষণের পরিমাণ অতিরিক্ত বৃদ্ধি পাচ্ছে। অন্যান্য তরঙ্গদৈর্ঘ্যে শোষণের পরিমাণ তুলনামূলকভাবে অনেক কম থাকে। অনুরণন অবস্থায় স্বাভাবিকের তুলনায় অনেক বেশী যৌগকেন্দ্রীনের সৃষ্টি হয়, সুতরাং নিউট্রনঘটিত বিক্রিয়ায় মোট প্রস্থচ্ছেদ মাপা হলে প্রতিটি অনুরণন শক্তিতে এই প্রস্থচ্ছেদের পরিমাণ সহসা বৃদ্ধি পাবে। একটি যৌগকেন্দ্রীন সৃষ্টি হলে এর ভিতর কি পরিমাণ উত্তেজনা শক্তি সঞ্চারিত থাকে তা সহজেই গণনা করা যায়। যদি একটি নিউট্রন বা প্রোটন যার ভরসংখ্যা এক, একটি কেন্দ্রীনের সঙ্গে ক্রিয়া করে যার ভরসংখ্যা A, তাহলে যৌগকেন্দ্রীন সৃষ্টির বিক্রিয়াটিকে আমরা নিম্নলিখিতভাবে উপস্থাপিত করতে পারি

$$1+A\rightarrow(A+1)^*$$

(*) চিহ্নটি এখানে উত্তেজিত কেন্দ্রীনকে নির্দেশ করে। মোট উত্তেজনাশক্তি বা যৌগকেন্দ্রীনের মধ্যে সঞ্চারিত থাকে তা হ'ল

$$E=[m_1+M_A-M_{A+1}]c^2+T_{m_1}-T_{M_{A+1}} \quad \cdots \quad 10.18$$

এক্ষেত্রে T_{m_1} এবং $T_{M_{A+1}}$ যথাক্রমে "1" এবং "A+1" কেন্দ্রীনদ্বয়ের গতিশক্তি। ভরবেগ সংরক্ষণের নীতি অনুসারে আমরা লিখতে পারি

$$m_1v=(m_1+M_A)v'$$

এখান এথেকে আমরা পাই

$$T_{m_1} - T_{M_{A+1}} = \frac{M_A}{m_1 + M_A} T_{m_1}$$

যেহেতু এখানে বিভিন্ন ভরগুলি অনুপাতের আকারে আবির্ভূত হয় আমরা অনায়াসেই ভরের স্থলে ভরসংখ্যা ব্যবহার করতে পারি ; সুতরাং এথেকে মোট উত্তেজনা শক্তির পরিমাণ হয়

$$E = [m_1 + M_A - M_{A+1}]\, c^2 + \frac{A}{A+1} T_{m_1} \quad \cdots \quad 10{\cdot}19$$

যৌগকেন্দ্রীনের এই পরিমাণ অতিরিক্ত উত্তেজনাশক্তি এর এক একটি উত্তেজিত কোয়াণ্টাম শক্তিস্তরের শক্তিকে নির্দেশ করে। (n, γ) বিক্রিয়ার মোট প্রস্থচ্ছেদ আপতিত নিউট্রনের শক্তির অপেক্ষক হিসাবে মাপা হলে এথেকে যৌগকেন্দ্রীনের অনুরণন শক্তি অর্থাৎ এর কোয়াণ্টাম শক্তিভরগুলির শক্তি নির্দ্ধারণ করা যায়।

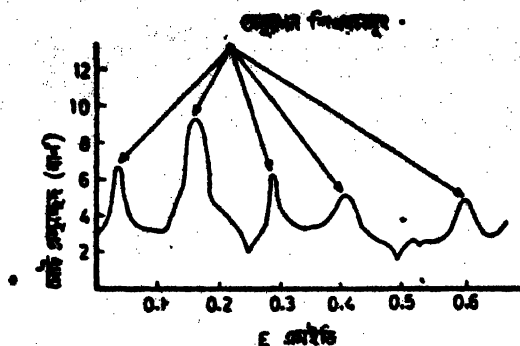
10·4 চিত্রে একটি নিউট্রনঘটিত অনুরণন বিক্রিয়ার প্রস্থচ্ছেদ নিউট্রনের গতিশক্তির অপেক্ষক হিসাবে দেখান হয়েছে, বিক্রিয়াটি হ'ল

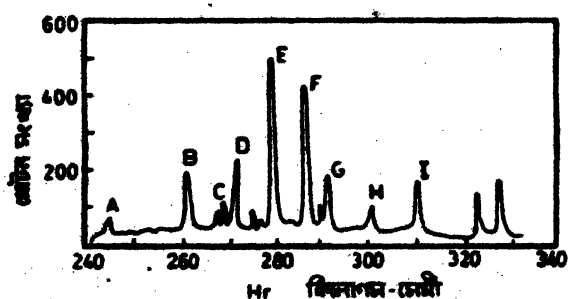
$${}_0n^1 + Na^{23} \rightarrow Na^{24} + \gamma$$

নিউট্রনশক্তি 0·04 এমইভি থেকে 0·6 এমইভির মধ্যে একাধিক অনুরণন শিখর লক্ষ্য করা যাচ্ছে, প্রতিটি বৃহৎ প্রস্থচ্ছেদের পরিমাণ নির্দ্দেশ করে যে ঐসকল শক্তিতে নিউট্রনগুলি অতিরিক্ত পরিমাণে শোষিত হয়, প্রতিটি শিখর Na^{24} কেন্দ্রীনের এক একটি শক্তিস্তরকে নির্দ্দেশ করে এবং ঐসকল স্তরের উত্তেজনা শক্তির পরিমাণ 10·19 সূত্র থেকে গণনা করা যায়। এই বিক্রিয়াটিতে অধিকতর নিউট্রন শক্তিতে আরও অনেক অনুরণন শিখর লক্ষ্য করা যায়। অন্যান্য আরও বিভিন্ন (n, γ) বিক্রিয়ার ক্ষেত্রে প্রস্থচ্ছেদ বনাম নিউট্রন শক্তির লেখগুলি সাধারণতঃ 10·4 লেখচিত্রের অনুরূপ হয়।

আরও একটি লক্ষণীয় বিষয় হ'ল এই যে, 10·4 লেখটিতে মোট প্রস্থচ্ছেদের পরিমাণ নির্দ্দেশিত হয়েছে, সুতরাং এর ভিতর (n, γ) বিক্রিয়ার প্রস্থচ্ছেদ এবং স্থিতিস্থাপক সংঘর্ষের প্রস্থচ্ছেদ উভয়ই বিদ্যমান। অনুরণন অঞ্চলে যেহেতু যৌগকেন্দ্রীনের সংখ্যা অতিরিক্ত বৃদ্ধি পায়, ঐ শক্তিতে স্থিতিস্থাপক বিক্ষুরণ এবং আহরণ প্রক্রিয়ার প্রস্থচ্ছেদও দ্রুত বৃদ্ধি পাবে। পরীক্ষায় পৃথক পৃথক ভাবে এই দুই বিক্রিয়ার প্রস্থচ্ছেদ মাপা যায় এবং দেখা গেছে যে

প্রতিটি অনুরণন শক্তিতে একই সঙ্গে উভয় প্রস্থচ্ছেদেরই শিখর সৃষ্টি হয়। এই পর্যবেক্ষণও যৌগকেন্দ্রীন প্রকল্পের বাস্তবতা প্রমাণ করে।

চিত্র 10·4 : $Na^{23}(n,\gamma)Na^{24}$ বিক্রিয়ার মোট প্রস্থচ্ছেদের ভিতর অনুরণন শিখর।

শুধু যে (n, γ) বিক্রিয়ায় কেন্দ্রীনের শক্তিস্তরগুলি পর্যবেক্ষণ করা যায় তা নয়, এই পর্যবেক্ষণ আরও বহুসংখ্যক বিভিন্ন বিক্রিয়ার প্রয়োগের দ্বারা করা সম্ভব। বিশেষ করে (p, γ), (p, n), এবং (d, p) বিক্রিয়াগুলি একাজে ব্যবহৃত হয়েছে। হাল্কা ও মাঝারি কেন্দ্রীনের উচ্চতর শক্তিস্তরগুলি পর্যবেক্ষণের জন্য (d, p) বিক্রিয়াগুলি বিশেষ উপযোগী, এক্ষেত্রে আপতিত ডিউটেরনের শক্তি ধ্রুব রাখা হয় এবং বিক্রিয়ার ফলে উৎপন্ন প্রোটনগুলির সংখ্যা শক্তির

চিত্র 10·5 : একশক্তিসম্পন্ন ডিউটেরনের দ্বারা সৃষ্ট $Al^{27}(d, p)Al^{28}$ বিক্রিয়ায় নির্গত প্রোটনের শক্তির বর্ণালীর ভিতর অনুরণন শিখরসমূহ।

অপেক্ষক হিসাবে মাপা হয়। 10·5 চিত্রে $Al^{27}(d, p)Al^{28}$ বিক্রিয়াটি থেকে প্রাপ্ত পরীক্ষালব্ধ ফলাফল প্রদর্শন করা হয়েছে। প্রোটনগুলিকে আপতিত ডিউটেরনের প্রবাহপথের সঙ্গে 90° কোণে লক্ষ্য করা হয়, দেখা যায় যে প্রোটনগুলি গোছায় গোছায় উৎপন্ন হয় অর্থাৎ বিশেষ বিশেষ শক্তিতে উৎপন্ন

প্রোটনের সংখ্যা হয় খুবই বেশী, অন্যান্য শক্তিতে এদের অনেক কম পরিমাণে লক্ষ্য করা যায়। 10'5 চিত্রে প্রোটনের এইসব অনুরণন শিখরগুলি লক্ষ্য করা যাচ্ছে। যৌগকেন্দ্রীন প্রকল্পের সাহায্যে আমরা বলতে পারি যে এই প্রত্যেকটি শিখর Al^{28} কেন্দ্রীনের এক একটি কোয়ান্টাম শক্তিস্তরকে নির্দেশ করে।

ডিউটেরন ও প্রোটনের শক্তি মেপে আমরা 10'16 সূত্র প্রয়োগ ক'রে সমগ্র বিক্রিয়াটির Q-পরিমাণ নির্ণয় করতে পারি। প্রত্যেকটি শিখরের জন্য একটি ক'রে স্বতন্ত্র Q-পরিমাণ নির্ণীত হয় এবং এই বিভিন্ন Q-পরিমাণগুলি থেকে Al^{28} কেন্দ্রীনটির শক্তিস্তরগুলি গণনা করা যায়। এই পরীক্ষায় বিক্রিয়াজাত প্রোটনগুলিকে একটি ভর মাপনীর আয়োজনের ভিতর এনে এদের শক্তি মাপা হয়। আপতিত ডিউটেরনের গতিশক্তির পরিমাণ 2'1 এমইভি, এই আপতিত শক্তিতে যে চরম প্রোটন শক্তি লক্ষ্য করা যায় তা চরম Q-পরিমাণ অর্থাৎ উৎপন্ন কেন্দ্রীনের ভূমিস্তরকে নির্দেশ করে; 10'5 চিত্রে A, B, C ইত্যাদি নামীয় শিখরগুলি Al^{28} কেন্দ্রীনের পরপর এক একটি উত্তেজিত শক্তিস্তরকে নির্দেশ করে।

অন্যান্য কণার দ্বারা ঘটিত বিক্রিয়া

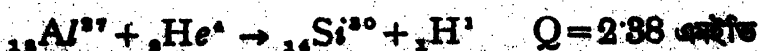
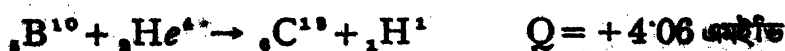
নিউট্রন ভিন্ন অন্যান্য কণা এবং আলোককণার দ্বারাও কেন্দ্রীনের বিক্রিয়া ঘটে, তবে আহিত কণাদের ক্ষেত্রে এদের যেহেতু কুলম্ব প্রতিরোধ অতিক্রম করতে হয়, এদের এজন্য অপেক্ষাকৃত অধিক শক্তিসম্পন্ন হওয়া প্রয়োজন। আহিত কণাদের শক্তি অপেক্ষাকৃত অনেক নির্ভুলভাবে পরিমাপ করা যায় এজন্য কোন কোন ক্ষেত্রে, বিশেষ ক'রে যখন Q-পরিমাণ নির্ভুলভাবে নির্ণয়ের প্রশ্ন ওঠে, সেসব ক্ষেত্রে আহিত কণাদের দ্বারা বিক্রিয়া ঘটান খুবই সুবিধাজনক। এই ধরণের বিপুলসংখ্যক কেন্দ্রীনের বিক্রিয়া ঘটতে দেখা যায়, আমরা এখানে শুধু কয়েকটি বিশেষ বিশেষ বিক্রিয়ার বিষয়ে সংক্ষেপে উল্লেখ করব।

(α, p) বিক্রিয়া :

রাদারফোর্ড দৃষ্ট আলফাকণা ও নাইট্রোজেন কেন্দ্রীনের মধ্যে প্রথম কেন্দ্রীন ঘটিত বিক্রিয়ার বিষয়ে আমরা প্রথমেই উল্লেখ করেছি, ঠিক একই ধরণের আরও বহুসংখ্যক বিক্রিয়া ঘটে; কয়েকটি উদাহরণ হ'ল

$${}_{5}B^{10} + {}_{2}He^{4} \rightarrow {}_{6}C^{13} + {}_{1}H^{1} \qquad Q = +4{\cdot}06 \text{ এমইভি}$$

$${}_{13}Al^{27} + {}_{2}He^{4} \rightarrow {}_{14}Si^{30} + {}_{1}H^{1} \qquad Q = 2{\cdot}38 \text{ এমইভি}$$

$${}_{19}K^{39} + {}_{2}He^{4} \rightarrow {}_{20}Ca^{42} + {}_{1}H^{1} \qquad Q = -0{\cdot}13 \text{ এমইভি}$$

একটি (α, n) বিক্রিয়ার নিদর্শনও আমরা পূর্বে দিয়েছি, এর সাহায্যে কুরী এবং জোলিও সর্বপ্রথম কৃত্রিম তেজস্ক্রিয় আইসোটোপ উৎপাদন করেন। এই ধরণের বিক্রিয়াগুলির দ্বারা কেন্দ্রীনের ভিতরে প্রোটনের সংখ্যা নিউট্রনের অনুপাতে বৃদ্ধি পায় এবং উৎপন্ন কেন্দ্রীনগুলি অনেকক্ষেত্রেই তেজস্ক্রিয় হয় এবং পজিট্রন নির্গমন ক'রে ক্ষয়িত হয়, কয়েকটি উদাহরণ হ'ল

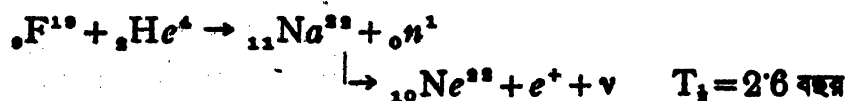
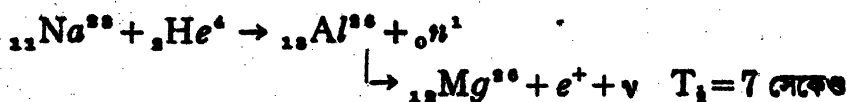
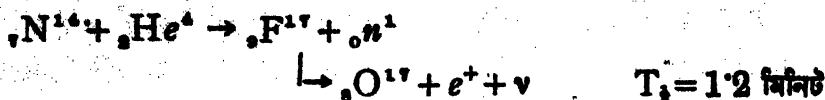
$$_{7}N^{14} + _{2}He^{4} \rightarrow _{9}F^{17} + _{0}n^{1}$$

$$\quad\quad \hookrightarrow _{8}O^{17} + e^{+} + \nu \qquad T_{\frac{1}{2}} = 1\cdot2 \text{ মিনিট}$$

$$_{11}Na^{23} + _{2}He^{4} \rightarrow _{13}Al^{26} + _{0}n^{1}$$

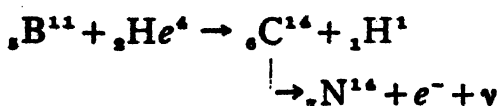
$$\quad\quad \hookrightarrow _{12}Mg^{26} + e^{+} + \nu \qquad T_{\frac{1}{2}} = 7 \text{ সেকেণ্ড}$$

$$_{9}F^{19} + _{2}He^{4} \rightarrow _{11}Na^{22} + _{0}n^{1}$$

$$\quad\quad \hookrightarrow _{10}Ne^{22} + e^{+} + \nu \qquad T_{\frac{1}{2}} = 2\cdot6 \text{ বছর}$$

অবশ্য আলফাকণার আঘাতে ইলেকট্রন ক্ষরণশীল তেজস্ক্রিয় কেন্দ্রীনও উৎপন্ন হতে পারে, একটি নিদর্শন হ'ল

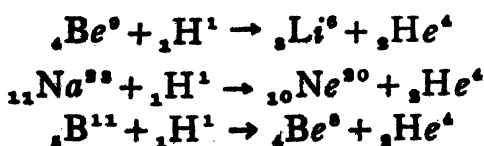
$$_{5}B^{11} + _{2}He^{4} \rightarrow _{6}C^{14} + _{1}H^{1}$$

$$\quad\quad \hookrightarrow _{7}N^{14} + e^{-} + \nu$$

(p, α) বিক্রিয়া :

কক্‌ক্রফ্‌ট্‌-ওয়ালটনের বিখ্যাত বিক্রিয়াটি আমরা পূর্বে আলোচনা করেছি, এক্ষেত্রেও প্রোটনের সঙ্গে বিক্রিয়ার একটি আলফাকণা উৎপন্ন হয়, একই ধরণের আরও অনেকগুলি বিক্রিয়া ঘটতে দেখা যায়

$$_{4}Be^{9} + _{1}H^{1} \rightarrow _{3}Li^{6} + _{2}He^{4}$$

$$_{11}Na^{23} + _{1}H^{1} \rightarrow _{10}Ne^{20} + _{2}He^{4}$$

$$_{5}B^{11} + _{1}H^{1} \rightarrow _{4}Be^{8} + _{2}He^{4}$$

শেষোক্ত বিক্রিয়াটিতে উৎপন্ন Be^{8} কেন্দ্রীনটি অত্যন্ত উত্তেজিত ও ক্ষণস্থায়ী এবং এটি শেষ পর্যন্ত দুটি আলফাকণায় ভেঙ্গে যায়

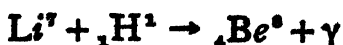
$$_{4}Be^{8} \rightarrow _{2}He^{4} + _{2}He^{4}$$

সুতরাং বিক্রিয়াটির ফলে শেষপর্যন্ত তিনটি আলফাকণা উৎপন্ন হয়।

(p, γ) বিক্রিয়া :

কতগুলি বিক্রিয়ায় প্রোটন শোষিত হয়ে একটি উত্তেজিত কেন্দ্রীন সৃষ্টি করে এবং এটি শেষ পর্যন্ত একটি গামারশ্মি বিকিরণ করে। এই ধরণের

ক্রিয়ার সাহায্যে খুব শক্তিশালী গামারশ্মি উৎপন্ন করা যায় সেগুলিকে পুনরায় কেন্দ্রীনের বিক্রিয়ার জন্য ব্যবহার করা যেতে পারে। এদের মধ্যে একটি উল্লেখযোগ্য উদাহরণ হ'ল

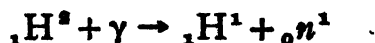
$$Li^7 + {}_1H^1 \rightarrow {}_4Be^8 + \gamma$$

এই বিক্রিয়ার ফলে 17·2 এমইভি শক্তিসম্পন্ন গামারশ্মি উৎপন্ন হয়। এছাড়া আরও একটি গামারশ্মির রেখা উৎপন্ন হয় যার শক্তি 14·4 এমইভি। এই দুই বিভিন্ন শক্তির গামারশ্মি উত্তেজিত Be^8 যৌগকেন্দ্রীনের দুটি শক্তিস্তরকে নির্দেশ করে। এত অধিক শক্তির গামারশ্মি প্রকৃতিজাত কোন তেজস্ক্রিয় কেন্দ্রীনের ক্ষরণে লক্ষ্য করা যায় না এবং কেন্দ্রীনের গবেষণায় এইসব গামারশ্মির বহুল প্রয়োগ হয়ে থাকে।

(γ, n) বিক্রিয়া ঃ

গামারশ্মির প্রভাবেও কেন্দ্রীনঘটিত বিক্রিয়া ঘটে, আপতিত গামারশ্মির শক্তি অন্ততঃ এত অধিক হওয়া প্রয়োজন যাতে কেন্দ্রীনের বদ্ধদশা থেকে একটি কণা মুক্ত হয়ে আসতে পারে ; পূর্ব্বে আমরা এই ধরণের একটি বিক্রিয়ার কথা উল্লেখ করেছি, এটি হ'ল

$${}_1H^2 + \gamma \rightarrow {}_1H^1 + {}_0n^1$$

এরকম অপর একটি বিক্রিয়া হ'ল

$${}_4Be^9 + \gamma \rightarrow {}_4Be^8 + {}_0n^1.$$

এই উভয় ক্ষেত্রেই নিউট্রনটি অপেক্ষাকৃত হাল্কাভাবে কেন্দ্রীনের ভিতর বদ্ধ থাকে এজন্য অপেক্ষাকৃত কম গামারশ্মির শক্তিতে বিক্রিয়া ঘটে। কিন্তু অন্যান্য ক্ষেত্রে বন্ধনশক্তির পরিমাণ অনেক বেশী হতে পারে এবং অধিকতর শক্তির গামারশ্মি প্রয়োজন হয় যা প্রাকৃতিক তেজস্ক্রিয়তার ভিতর পাওয়া যায় না। তখন পূর্ব্বোক্ত লিথিয়াম-প্রোটন বিক্রিয়ার উৎপন্ন শক্তিশালী গামারশ্মির ব্যবহার বিশেষ সুবিধাজনক, এছাড়া বিটাট্রনের সাহায্যে উৎপন্ন অত্যধিক শক্তিশালী রঞ্জনরশ্মি একাজে ব্যবহৃত হয়। কেন্দ্রীনের ভিতর সর্ব্বশেষ প্রোটন অথবা সর্ব্বশেষ নিউট্রনের বন্ধনশক্তি নির্দ্ধারণের জন্য (γ, p) ও (γ, n) বিক্রিয়াগুলি খুবই উপযোগী।

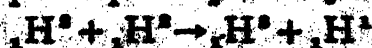
নিউট্রনের উৎস

যেহেতু নিউট্রন কেন্দ্রীনের বিক্রিয়া সৃষ্টিতে খুবই তৎপর, এর বিক্রিয়াগুলি সম্বন্ধে গবেষণা করার জন্য সুবিধাজনক নিউট্রনের উৎস তৈরী করা প্রয়োজন। যেসমস্ত বিক্রিয়ায় নিউট্রন উৎপন্ন হয় তাদের সাহায্যেই সুবিধাজনক নিউট্রনের

উৎস প্রস্তুত করতে হয়, এদের মধ্যে প্রাচীনতম হ'ল রেডিয়াম-বেরিলিয়াম বা পলোনিয়াম-বেরিলিয়াম উৎস। একটি আবদ্ধ টিউবের ভিতর রাখা বেরিলিয়াম ও রেডিয়াম যোগের মিশ্রণ নিউট্রনের উৎস হিসাবে ব্যবহৃত হতে পারে। বেরিলিয়ামের উপর রেডিয়াম আলফাকণার আঘাতে নিউট্রন সৃষ্টি হতে থাকে, তাছাড়া রেডিয়ামের ক্ষরণের ফলে যে র‍্যাডন গ্যাস উৎপন্ন হয় তাও আলফাক্ষরণশীল এবং নিউট্রন উৎপাদনে অংশগ্রহণ করে। এজন্য এই ধরণের উৎসের ভিতর নিউট্রন উৎপাদনের হার ক্রমশঃ বৃদ্ধি পেতে থাকে যতক্ষণ পর্য্যন্ত না তা অবশেষে একটি সমাবস্থায় এসে পৌঁছায়। এই ধরণের উৎস থেকে অবশ্য অনন্যশক্তিবিশিষ্ট নিউট্রন পাওয়া যায় না, কিন্তু অপেক্ষাকৃত সহজে প্রস্তুত করা যায় ব'লে গবেষণাগারে এদের ব্যবহার বিশেষ প্রচলিত।

আলোককেন্দ্রীন বিক্রিয়ার দ্বারাও পরীক্ষাগারে অপেক্ষাকৃত সহজে নিউট্রন উৎপন্ন করা যায়। H^2 এবং $_4Be^9$ কেন্দ্রীনদ্বয়ের ভিতর উন্মোচনক্ষম একটি নিউট্রনের বন্ধনশক্তি যথাক্রমে 2·22 এবং 1·66 এমইভি। গামারশ্মির উৎস হিসাবে কোন একটি তেজস্ক্রিয় আইসোটোপ ব্যবহার করা যায় যাথেকে নির্গত গামারশ্মির শক্তি যথোপযুক্ত পরিমাণের হয়ে থাকে, যেমন Na^{24} তেজস্ক্রিয় আইসোটোপটির ক্ষরণজাত গামারশ্মির শক্তি 2·76 এমইভি, এছাড়া কোন কোন প্রাকৃতিক তেজস্ক্রিয় পদার্থ যেমন রেডিয়ামের গামারশ্মিও একাজে ব্যবহৃত হতে পারে। এই পদ্ধতিতে অনন্যশক্তিসম্পন্ন শক্তিশালী নিউট্রন উৎপন্ন করা যায়। অধিকতর শক্তির নিউট্রন পেতে হলে আরও শক্তিশালী গামারশ্মির প্রয়োজন যা পূর্ব্বোক্ত $Li^7(p, \gamma)Be^8$ বিক্রিয়া থেকে পাওয়া সম্ভব।

অধিক শক্তিসম্পন্ন নিউট্রন উৎপন্ন করা যায় ত্বরিত ডয়টেরনের কিছু কিছু বিক্রিয়া থেকে। এইসব বিক্রিয়ায় ডয়টেরন কেন্দ্রীনটি ভেঙ্গে যায়, প্রোটনটি ঘাতবহ কেন্দ্রীনের সঙ্গে মিলিত হয়ে একটি ভিন্ন কেন্দ্রীনের সৃষ্টি করে এবং মুক্ত নিউট্রনটি বিচ্ছুরিত হয়ে যায়। এইভাবে উৎপন্ন নিউট্রন আপতিত ডয়টেরনের শক্তির এক বিরাট অংশ বহন করে, অর্থাৎ যথোপযুক্ত শক্তির ডয়টেরনের দ্বারা অত্যন্ত তীব্রশক্তিসম্পন্ন নিউট্রন উৎপন্ন করা যায়। ডয়টেরনের দ্বারা নিউট্রন উৎপাদনের কয়েকটি বিক্রিয়া হ'ল

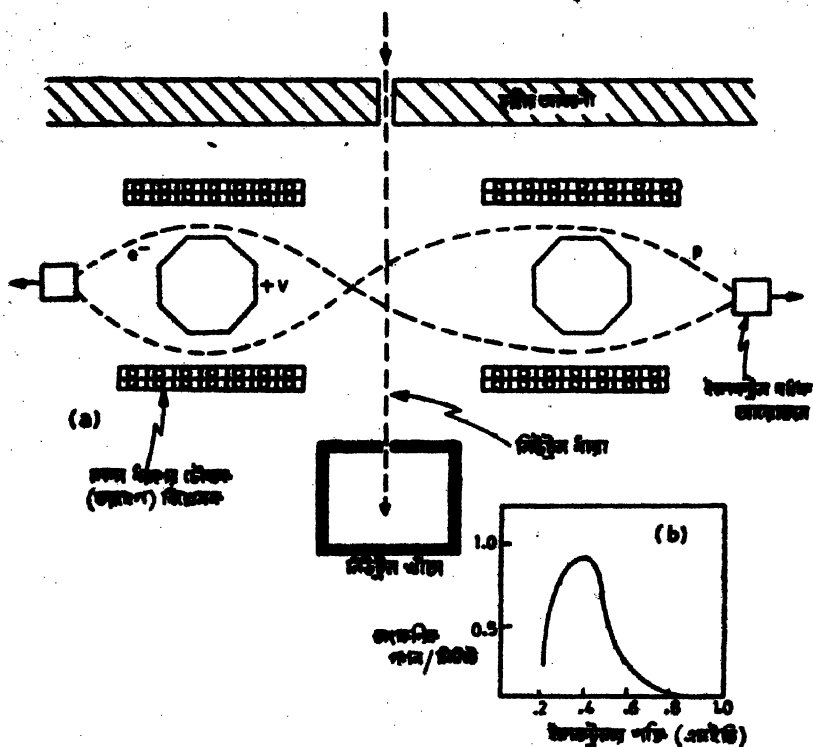
$$_1H^2 + {_1H^2} \rightarrow {_2He^3} + {_0n^1}$$
$$_1H^2 + {_1H^2} \rightarrow {_1H^3} + {_1H^1}$$
$$_4Be^9 + {_1H^2} \rightarrow {_5B^{10}} + {_0n^1}$$

[illegible] আরও অন্যান্য অনেক কেন্দ্রীন থেকেই শক্তিশালী ডয়টেরনের [illegible] নিউট্রন উৎপাদন করা যায়। এভাবেও তীব্রশক্তিসম্পন্ন অনন্যশক্তি-[illegible] নিউট্রন উৎপন্ন হয়।

পারমাণবিক চুল্লী হ'ল আরেকটি উৎস যার ভিতর ব্যাপক পরিমাণে নিউট্রন উৎপন্ন হয়ে থাকে। একটি আধুনিক চুল্লীতে নিউট্রন ক্ষেত্রপ্রাবল্য প্রতি বর্গ সেন্টিমিটারে প্রতি সেকেণ্ডে 10^{12} অথবা তারও বেশী হওয়া সম্ভব। পারমাণবিক চুল্লীর বিবরণ পরবর্তী অধ্যায়ে দেওয়া হবে। অত্যধিক তীব্রতাসম্পন্ন নিউট্রন প্রবাহ পেতে হলে পারমাণবিক চুল্লীই হ'ল সর্বোৎকৃষ্ট উপায়। বিভিন্ন পদার্থকে চুল্লীর ভিতর তীব্র নিউট্রন প্রবাহের সম্মুখীন ক'রে নানারকম তেজস্ক্রিয় আইসোটোপ উৎপন্ন করা যায়, যথেষ্ট পরিমাণে তেজস্ক্রিয় আইসোটোপ উৎপাদনের এটি হ'ল অন্যতম প্রচলিত পদ্ধতি।

নিউট্রনের ক্ষরণ

মুক্ত অবস্থায় নিউট্রন একটি অস্থায়ী কণা তা পূর্বে বলা হয়েছে, এর গড় জীবনকাল প্রায় 17 মিনিট। নিউট্রনের স্থির ভর প্রোটনের তুলনায় 0·78 এমইভি বেশী, এথেকে আশা করা যায় যে একটি মুক্ত নিউট্রন একটি প্রোটন এবং একটি ইলেকট্রনে ক্ষরিত হতে পারে, যদি অবশ্য ক্ষরণ ঘটতে পারে এমন পরিক্রিয়ার অস্তিত্ব এর মধ্যে বর্তমান থাকে। কিন্তু একটি নিউট্রনের গড় জীবনকাল বেশ কয়েক মিনিট এবং ঐ সময়ের মধ্যে একটি দ্রুত নিউট্রন কয়েক মিলিয়ন মাইল ভ্রমণ করতে পারে, সুতরাং এদের ক্ষরণ লক্ষ্য করতে হলে অত্যধিক তীব্রতাসম্পন্ন খুব শ্লথ নিউট্রনের প্রবাহ ব্যবহার করা প্রয়োজন। তাছাড়া একটি প্রোটন-ইলেকট্রনের জোড়া যা একটি নিউট্রনের ক্ষরণের দ্বারা উৎপন্ন হয়, সেটিকে ঐ তীব্র নিউট্রন প্রবাহের সঙ্গে সংশ্লিষ্ট আহিত কণাসমন্বিত বহুসংখ্যক ঘটনার পশ্চাদ্‌ভূমি থেকে পৃথক ক'রে লক্ষ্য করতে হবে।

রবসন কতগুলি বিস্তৃত পরীক্ষার সাহায্যে নিউট্রনের গড় জীবনকালের মোটামুটি একটি নির্ভুল পরিমাণ নির্ণয় করতে সক্ষম হন। তিনি ক্যানাডার চক রিভার পরীক্ষাকেন্দ্রের একটি পারমাণবিক চুল্লী থেকে উৎপন্ন অত্যধিক তীব্রতাসম্পন্ন শ্লথ নিউট্রন প্রবাহের উপর পরীক্ষা চালান। ঐ নিউট্রন প্রবাহের ভিতর নিউট্রনের ক্ষেত্রপ্রাবল্য (flux) ছিল 10^{8} সংখ্যক কণা/সেক/সেমি², এই পরীক্ষার আয়োজন 10·6 চিত্রে দেখান হয়েছে। চুল্লীর মধ্যে একটি ছিদ্র থেকে নিউট্রনগুলি একটি বায়ুশূন্য 'ক্ষরণ অঞ্চলে' এসে কেন্দ্রী

হয়। তারপর সেগুলি অগ্রসর হয়ে একটি নিউট্রন "খাঁচার" ভিতর এসে পড়ে। এই "খাঁচাটি" নিউট্রন ও অন্যান্য তেজস্ক্রিয়-বিকিরণ শোষণক্ষম পদার্থের সাহায্যে এমনভাবে তৈরী হয়েছে যাতে এটি নিউট্রন প্রবাহকে সম্পূর্ণরূপে শোষণ ক'রে ফেলতে পারে, এবং নিউট্রন শোষণের ফলে উৎপন্ন অন্যান্য আহিত কণা বা বিকিরণ যেন পুনরায় ঐ ক্ষরণ অঞ্চলের ভিতর এসে উপস্থিত হতে না পারে। ক্ষরণ অঞ্চলের একপাশে একটি বিদ্যুৎ-ধারকের মধ্যে অত্যুচ্চ ধনবিভব প্রয়োগ ক'রে ইলেকট্রনগুলিকে স্ব প্রোটনের

চিত্র 10·6 : (a) নিউট্রনের অর্ধজীবনকাল নির্ণয়ের পরীক্ষার আয়োজন; (b) পরীক্ষায় প্রাপ্ত ইলেকট্রনের শক্তি বনাম তাৎক্ষণিক গণনার সংখ্যার লেখ।

ভিতর থেকে পৃথক ক'রে নিয়ে আসা হয়। প্রোটনগুলি বিদ্যুৎধারকের দ্বারা বিকর্ষিত হয়ে বিপরীতদিকে একটি চৌম্বক বিশ্লেষকের মধ্য দিয়ে গিয়ে একটি ইলেকট্রন বর্ধক নল জাতীয় গণনকারের মধ্যে এসে পড়ে এবং গণ্য হয়। প্রোটনগুলির সঙ্গে সংশ্লিষ্ট ইলেকট্রনগুলি বিপরীত দিকে একটি রিং আকৃতির চৌম্বক বিশ্লেষকের ভিতর দিয়ে প্রবাহিত হয় বা নির্দিষ্ট

তরঙ্গান্তর সমন্বিত ইলেকট্রনগুলিকে একটি বিশেষ বিন্দুতে ফোকাস করতে পারে। এই ফোকাস বিন্দুটির উপর একটি চমক গণনকার রাখা হয় এবং এটি প্রোটন গণনকারটির সঙ্গে তাৎক্ষণিকতা আয়োজনে যুক্ত থাকে। আয়োজনটি এমন যে প্রতিটি যথার্থ প্রোটন-ইলেকট্রনের জোড়া গণ্য হবার সঙ্গে সঙ্গে ইলেকট্রনের ভরবেগও চৌম্বক বিশ্লেষকের সাহায্যে নির্ধারিত হয়।

রবসনের পরীক্ষা * থেকে ইলেকট্রনের শক্তির যে বর্ণালী পাওয়া গিয়াছে তা 10·6(b) চিত্রে দেখান হয়েছে, এখানে তাৎক্ষণিক গণনার হার শক্তির অপেক্ষক হিসাবে আঁকা হয়েছে। বর্ণালীতে ইলেকট্রনের শক্তির একপ্রকার সন্তত বিতরণ লক্ষ্য করা যাচ্ছে, 0·78 এমইভি চরম শক্তি পর্য্যন্ত সমস্ত ইলেকট্রনগুলিই এই পরীক্ষায় গণ্য হয়েছে। ঠিক এই ধরণের বিতরণ যাবতীয় বিটা ক্ষরণের মধ্যেই লক্ষ্য করা যায়, সুতরাং এথেকে বোঝা যায় যে এক্ষেত্রেও ক্ষরণের ফলে একটি নিউট্রিনো উৎপন্ন হয়।

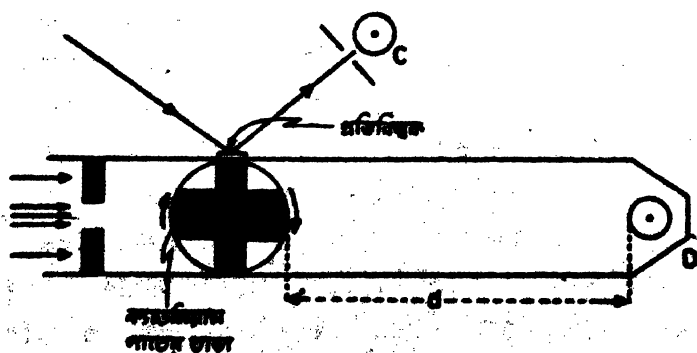
শ্লথ নিউট্রনের শক্তি নির্ধারণ পদ্ধতি

নিউট্রনের বিভিন্ন ধরণের বিক্রিয়ার প্রস্থচ্ছেদের জ্ঞান কেন্দ্রীনবিজ্ঞানের পক্ষে অত্যন্ত প্রয়োজনীয়, বিশেষ ক'রে যেসকল নিউট্রনের শক্তি অত্যন্ত কম তাদের বিভিন্ন প্রস্থচ্ছেদের জ্ঞান পারমাণবিক চুল্লী নির্ম্মাণের পক্ষে অপরিহার্য্য। যেসব নিউট্রনের শক্তি 0·05 এমইভির কম তাদের সাধারণতঃ বলা হয় তাপীয় নিউট্রন, এইরকম শক্তিসম্পন্ন নিউট্রনের প্রস্থচ্ছেদ শক্তির অপেক্ষক হিসাবে মাপতে হলে প্রথমে এদের শক্তি খুব সূক্ষ্মভাবে পরিমাপ করা প্রয়োজন। খুব অল্পশক্তির নিউট্রনকে অনন্যশক্তিবিশিষ্ট অবস্থায় উৎপন্ন করা যায় না। শক্তিশালী নিউট্রনকে মোম, গ্রাফাইট ইত্যাদি পদার্থের ভিতর দিয়ে চালিত ক'রে ক্রমাগত সংঘর্ষের দ্বারা এদের শক্তি হ্রাস ক'রে তাপীয় অবস্থায় আনা হয়। 10·7 চিত্রে একটি পদ্ধতির আয়োজন দেখান হয়েছে যার সাহায্যে তাপীয় নিউট্রনের শক্তি খুব সূক্ষ্মভাবে পরিমাপ করা যায়। এই পদ্ধতির মূল অঙ্গ হ'ল একটি গোলক G যার ভিতর পাশাপাশি সাজান ক্যাডমিয়াম ও অ্যালুমিনিয়ামের পাতের গোছার অস্তিত্ব আছে। গোলকটিকে একটি নলের ভিতর রাখা হয় এবং একপাশ থেকে তাপীয় নিউট্রনের ধারা এর ভিতরে প্রবেশ করে। ক্যাডমিয়াম অত্যধিক পরিমাণে

* J. M. Robson, Phys. Rev. 78, 311 (1950)
Phys. Rev. 100, 933 (1955)

তাপীয় নিউট্রন শোষণ করে এবং অ্যালুমিনিয়ামের ভিতর তাপীয় নিউট্রন শোষিত হয় না। অর্থাৎ নিউট্রন ধারাটির কাছে অ্যালুমিনিয়াম স্বচ্ছ এবং ক্যাডমিয়াম সম্পূর্ণ অস্বচ্ছ প্রতিভাত হবে। G গোলকটিকে ঘোরাবার ব্যবস্থা আছে এবং ঘোরাবার সময় যখন পাশাপাশি রাখা ধাতুর পাতগুলি আপতিত নিউট্রন ধারার সঙ্গে সমান্তরাল হয় তখনই শুধু নিউট্রনগুলি এর ভিতর দিয়ে বেরিয়ে আসতে পারে। গোলকটির গায়ে একটি ছোট্ট আয়না লাগান থাকে যেটি এর সঙ্গে সঙ্গে ঘুরতে থাকে। যে মুহূর্তে ধাতুর পাতগুলি এবং নিউট্রনের ধারা পরস্পর সমান্তরাল হয় শুধু তখনই ঐ আয়নাটির ভিতর থেকে একটি আলোকরশ্মি প্রতিফলিত হয়ে C ফোটোসেলটির উপর পড়ে এবং একে ক্রিয়াশীল ক'রে তোলে। D একটি নিউট্রন গণনকার, এর সঙ্গে C-এর সংযোগ আছে। D সবসময় ক্রিয়াশীল থাকে না, কিন্তু ইলেকট্রনিক বর্তনীর দ্বারা এমন ব্যবস্থা করা থাকে যাতে C ক্রিয়াশীল হবার পর নির্দিষ্ট সময় অন্তর Δt অতিক্রান্ত হলে Dও ক্রিয়াশীল হয়ে ওঠে। সুতরাং এই আয়োজনের সাহায্যে যেসব নিউট্রন D গণনকারের ভিতর গণ্য হয় তাদের গতিবেগ সহজেই মাপা যায়, এক্ষেত্রে গতিবেগের পরিমাণ হ'ল

$$v = \frac{d}{\Delta t} \qquad \cdots \qquad 10{\cdot}20$$

ছবিতে d দূরত্ব প্রদর্শন করা হয়েছে। আপতিত নিউট্রন ধারাটির ভিতর বিভিন্ন গতিবেগের নিউট্রন থাকতে পারে, কিন্তু এই পদ্ধতির আয়োজন

চিত্র 10·7 ঃ মন্দ নিউট্রনের গতি নির্ধারণের একটি পরীক্ষার আয়োজন।

এইরকম যে এর দ্বারা শুধু সেইসব নিউট্রনগুলিই নির্দেশিত হবে যাদের গতিবেগ 10·20 সমীকরণটির দ্বারা প্রদত্ত। গোলকটিকে একটি বৈদ্যুতিক মোটরের

সাহায্যে ঘোরান যায়, এর কৌণিক গতিবেগ বাড়িয়ে কমিয়ে এবং সেই সঙ্গে এদের পরিমাণও পরিবর্তিত ক'রে বিভিন্ন শক্তিবিশিষ্ট নিউট্রনের গতিবেগে রাখা হয়। কোন পদার্থের ভিতর নিউট্রনের শোষণের পরিমাণ মাপতে হলে ঐ পদার্থের একটি খুব সরু পাত নিউট্রনের গতিপথে গোলক ও গণনকারের মাঝখানে রাখা হয় এবং গণনকারটির সাহায্যে কি পরিমাণে নিউট্রন শোষিত হচ্ছে তা মাপা হয়। এই পদ্ধতির প্রয়োগ নির্ভর করবে কত দ্রুতগতিতে গোলকটি ঘোরান যায় তার উপর। 0·3 ইভির চেয়ে অধিক শক্তি এভাবে মাপা যায় না।

ঘূর্ণনশীল গোলকের ব্যবহার ছাড়াও এই পদ্ধতি প্রয়োগ করা যায়, তখন বিশেষ বৈদ্যুতিক আয়োজনের দ্বারা এমনভাবে নিউট্রনের উৎস নির্মাণ করা হয় যাতে এর ভিতর থেকে শুধু ক্ষণে ক্ষণে, অর্থাৎ নির্দিষ্ট সময় পরপর খুব অল্প সময়ের জন্য নিউট্রন উৎপন্ন হয়। এইরকম নিউট্রনের উৎস চক্রত্বরকজাত কণা বর্ষণের দ্বারা সৃষ্টি করা যায় এবং বৈদ্যুতিক বর্তনীর সাহায্যে ঠিক পূর্ববর্তী আয়োজনের মতই উৎস এবং গণনকারের ভিতর নির্দ্ধারিত পরিমাণের সময় বিরতি সৃষ্টি ক'রে রাখা হয়।

স্ফটিকের ভিতর নিউট্রনের ডিব্রগলি তরঙ্গের ব্যতিচার ক্রিয়ার সাহায্য নিয়ে নিউট্রনের শক্তি নির্ধারণ করার অপর একটি উপায় আছে। নিউট্রনের ডিব্রগলি তরঙ্গদৈর্ঘ্য 3·13 সূত্রের দ্বারা প্রকাশিত, শক্তি যত কম হয় তরঙ্গদৈর্ঘ্য ততই বৃদ্ধি পেতে থাকে, তাপীয় নিউট্রনের ডিব্রগলি তরঙ্গদৈর্ঘ্য সাধারণ রঞ্জনরশ্মির তরঙ্গদৈর্ঘ্যের সঙ্গে তুলনীয় এবং এদের দ্বারা সহজেই ব্যতিচার ক্রিয়া ঘটান সম্ভব। এই উপায়ে অনন্যশক্তিসম্পন্ন নিউট্রন ধারা প্রস্তুত করা সম্ভব। এর জন্য অবশ্য অনেক বেশী তীব্রতাসম্পন্ন নিউট্রন প্রবাহের প্রয়োজন হয় এবং পরীক্ষাগারে সাধারণতঃ যেসমস্ত নিউট্রন উৎস ব্যবহার করা হয়, যেমন বেরিলিয়াম-রেডিয়াম উৎস ইত্যাদি, সেগুলির ব্যবহারের দ্বারা স্ফটিক ব্যতিচার লক্ষ্য করার সম্ভাবনা নেই। বর্তমানে পারমাণবিক চুল্লীর ভিতর থেকে অত্যধিক তীব্রতাসম্পন্ন নিউট্রন প্রবাহ পাওয়া যেতে থাকার পর থেকে নিউট্রন স্ফটিক ব্যতিচার পরীক্ষায় সাফল্য লাভ করা সম্ভব হয়েছে। নিউট্রন ব্যতিচারের পদ্ধতি রঞ্জনরশ্মির ব্যতিচারের সঙ্গে প্রায় অভিন্ন, এক্ষেত্রে খুব মিহি নিউট্রনের ধারা সৃষ্টি করার জন্য ক্যাডমিয়াম প্রতিবন্ধক ব্যবহার করা হয়, BF_3 গ্যাসপূর্ণ গণনকারের দ্বারা বিচ্ছুরিত নিউট্রন পর্যবেক্ষণ করা হয়, ব্যতিচারের কয়েকটি পরীক্ষায় NaCl, কোয়ার্টজ ইত্যাদি স্ফটিক ব্যবহৃত হয়েছে।

জালিগ্রন্থার ও ব্র্যাগ প্রতিবিম্বন কোণ θ জানা থাকলে 3·13 ও 3·14 সূত্রের ব্যবহার ক'রে নিউট্রনের তরঙ্গদৈর্ঘ্য ও গতিবেগ মাপা যায়। বর্তমানে স্ফটিকের গঠন সংক্রান্ত গবেষণায় নিউট্রন ব্যতিচার পদ্ধতি খুবই ব্যবহৃত হয়।

রঞ্জনরশ্মি ব্যতিচারের সঙ্গে নিউট্রন ব্যতিচারের কিন্তু কিছু ক্ষেত্রে সামান্য পার্থক্য দৃষ্ট হয়; নিউট্রনের নির্দিষ্ট পরিমাণ চৌম্বক ভ্রামক আছে এবং ব্যতিচারী স্ফটিকটির ভিতর যদি তীব্র চৌম্বকক্ষেত্রের অস্তিত্ব থাকে তবে তা ঐ ভ্রামকের সঙ্গে ক্রিয়া করবে। এইপ্রকার পরিক্রিয়া লোহার স্ফটিকের ভিতর ঘটতে দেখা যায় এবং এর সাহায্য নিয়েই নিউট্রনের চৌম্বক ভ্রামক মাপা হয়েছে।

প্রশ্নমালা

(1) নিম্নলিখিত বিক্রিয়াগুলির Q-পরিমাণ নির্ণয় কর

$H^1(n,\gamma)$, $H^2(n,\gamma)$, $Li^7(p,n)$, $Li^7(p,\alpha)$

[2·225 এমইভি, 6·25 এমইভি, −1·645 এমইভি, 17·34 এমইভি]

(2) নিম্নলিখিত বিক্রিয়াটির Q-পরিমাণ −0·628 এমইভি

$$C^{14} + p \rightarrow N^{14} + n + Q$$

C^{14} এবং N^{14}এর ভরের পার্থক্য নির্ণয় কর এবং $C^{14} \rightarrow N^{14} + e^- + v$ β-ক্ষরণে নির্গত শক্তির পরিমাণ নির্ণয় কর।

[$M(C^{14}) - M(N^{14}) = M$ (নিউট্রন) $- M$ (প্রোটন) $- 0{\cdot}628/931{\cdot}3$

$= 1{\cdot}008982 - 1{\cdot}008142 - 0{\cdot}000674$

$= 0{\cdot}000166$ এএমইউ $= 0{\cdot}154$ এমইভি = বিটা ক্ষরণের শক্তি]

(3) Li^7 কেন্দ্রীনটি ডিউটেরনের দ্বারা আঘাত করা হলে শেষ পর্যন্ত দুটি আলফাকণা এবং একটি নিউট্রন উৎপন্ন হয়। এই বিক্রিয়ায় কত পরিমাণ শক্তি নির্গত হয় বা শোষিত হয় নির্ণয় কর।

[15·11 এমইভি (নির্গত)]

(4) B^{10} আইসোটোপকে নিউট্রনের দ্বারা আঘাত করলে তার ফলে Li^7 এবং আলফাকণা উৎপন্ন হয়। এর ফলে কি পরিমাণ শক্তি শোষিত বা নির্গত হবে নির্ণয় কর।

[2·79 এমইভি (নির্গত)]

(5) নিম্নলিখিত বিক্রিয়াটিতে

$$p + Li^7 \rightarrow He^4 + H^{44}$$

আপাতত প্রোটনের শক্তি 0·27 এমইভি এবং উভয় আলফাকণার শক্তি 8·8 এমইভি। H^1 এবং He^4 এর ভরের পরিমাণ থেকে এবং গতিশক্তির উদ্ভব হয় ভরের শক্তিতে পরিবর্তনের দ্বারা এই নীতির উপর নির্ভর ক'রে Li^7 এর পারমাণবিক ভর নির্ণয় কর। [7·01819 এএমইউ]

(6) ধরা যাক একটি নিউট্রনের ধারা যেখানে প্রত্যেকটি নিউট্রনের গতিবেগ v সেমি/সেকেণ্ড এবং ঐ ধারার ভিতর প্রতি সি.সি. ঘনায়তনে নিউট্রনের সংখ্যা n, এহেন অবস্থায় nv গুণফলকে বলা হয় নিউট্রনের ক্ষেত্রপ্রাবল্য (flux), এই পরিমাণ হ'ল প্রতি সেকেণ্ডে যতসংখ্যক নিউট্রন এক বর্গসেন্টিমিটার বর্গায়তনের ভিতর দিয়ে অতিক্রান্ত হয় তার পরিমাণ। আমরা প্রস্থচ্ছেদের সংজ্ঞার সঙ্গে পরিচিত, স্পষ্টই দেখা যায় যে প্রস্থচ্ছেদ σ এবং নিউট্রন ক্ষেত্রপ্রাবল্য nv এর গুণফল হবে যে হারে প্রতি কেন্দ্রীন পিছু নিউট্রনের দ্বারা সংঘটিত কেন্দ্রীনের বিক্রিয়া ঘটছে তার সমান। একটি পারমাণবিক চুল্লীর ভিতর নিউট্রনের ক্ষেত্রপ্রাবল্য খুব বেশী থাকে এবং এজন্য চুল্লীর ভিতর কোন মৌল রাখলে নিউট্রন বর্ষণের দ্বারা এর তেজস্ক্রিয় আইসোটোপ উৎপাদন করা সম্ভব। সাধারণতঃ (n, γ) বিক্রিয়ার দ্বারা তাপীয় নিউট্রনগুলি শোষিত হয়ে তেজস্ক্রিয় আইসোটোপ উৎপন্ন হয়, এইভাবে বহুসংখ্যক আইসোটোপ অপেক্ষাকৃত সহজেই উৎপন্ন করা যায়। এই প্রক্রিয়াকে সাধারণভাবে নিউট্রন ঘটিত আবাহন (neutron activation) আখ্যা দেওয়া হয়।

এইবার নিম্নলিখিত সমস্যাটির কথা বিচার করা যাক। 200 মিলিগ্রাম ওজনের সোনার পাত কোন চুল্লীর ভিতর তাপীয় নিউট্রন ক্ষেত্রপ্রাবল্যের মধ্যে রাখা হয়েছে, ক্ষেত্রপ্রাবল্যের পরিমাণ ধরা যাক 10^{12} নিউট্রন/বর্গসেমি/সেকেণ্ড। চরম কত পরিমাণ ক্রিয়াশীলতা ঐ সোনার পাতের ভিতর সৃষ্টি হওয়া সম্ভব? (সোনার তাপীয় নিউট্রন আবাহন প্রস্থচ্ছেদ 94 বার্ন)।

সমাধান: উৎপাদনের হার নির্ণয় করার জন্য আমরা নিম্নলিখিত সমীকরণটি ব্যবহার করি

$$A = F \times \sigma_{act} \times N$$

এখানে A = উৎপন্ন তেজস্ক্রিয় আইসোটোপের সংখ্যা, F = নিউট্রন ফ্লাক্স/প্রাবল্য, σ_{act} = নিউট্রন সক্রিয়ন প্রস্থচ্ছেদ এবং N = খাতবহ সোনার কেন্দ্রীনের মোট সংখ্যা। N এর পরিমাণ নিম্নলিখিত প্রকাশনের দ্বারা প্রদত্ত

$$N = \frac{m}{M} \times 6.02 \times 10^{23}$$

এখানে *m* হ'ল পরীক্ষাধীন পদার্থের ওজন (গ্রাম), M, এর পারমাণবিক ভর (গ্রাম) এবং অবশিষ্ট রাশিটি এ্যাভোগাড্রো সংখ্যা।

সুতরাং
$$A = \frac{0.602 \times F \times \sigma_{act} m}{M}$$

এক্ষেত্রে প্রস্থচ্ছেদ বার্নে প্রকাশিত। এইবার প্রদত্ত রাশিগুলি ব্যবহার করলে আমরা পাই

$$A = \frac{(10^{12})(94)(0.2)}{197} \times 0.602$$

$$= 5.7 \times 10^{10} \text{ সংখ্যক বিক্রিয়া/সেকেণ্ড}$$

অর্থাৎ এক্ষেত্রে চরম ক্রিয়াশীলতা প্রায় 1.5 ক্যুরীর সমান হওয়া সম্ভব।

(7) নাইট্রোজেনের (α, p) বিক্রিয়ার জন্য 7 সেমি দৌড়দূরত্ব বিশিষ্ট RaC' এর আলফাকণা ব্যবহৃত হয়েছে এবং প্রতি 10^5 সংখ্যক আপতিত আলফাকণার জন্য মাত্র দুটি ক্ষেত্রে ঐ বিক্রিয়া ঘটতে দেখা যায়, এথেকে নাইট্রোজেনের (α, p) বিক্রিয়ার প্রস্থচ্ছেদ নির্ণয় কর।

সমাধান : যেহেতু 7 সেমি দৌড়দূরত্বের আলফাকণা ব্যবহৃত হয়েছে আমরা ধরে নিতে পারি যে আলফাকণার ধারা যার প্রস্থচ্ছেদ 1 বর্গসেমি গ্যাসের এক ঘনায়তনের ভিতর আপতিত হয়েছে যার প্রস্থচ্ছেদ 1 বর্গসেমি এবং দৈর্ঘ্য 7 সেমি। প্রতি সি.সি. NTP নাইট্রোজেন গ্যাসে 5.3×10^{19} সংখ্যক নাইট্রোজেন কেন্দ্রীন থাকে। প্রস্থচ্ছেদের সূত্রটি নিম্নলিখিতভাবে লেখা যায়

$$N_r = N_i N t \sigma$$

অর্থাৎ, $2 = 10^5 \times 5.3 \times 10^{19} \times 7 \times \sigma$

$$\sigma = \frac{2}{3.71 \times 10^{25}} = 5.4 \times 10^{-26} \text{ বর্গসেমি}$$

$$= 0.054 \text{ বার্ন}$$

(8) C^{13} (d, p) C^{14} বিক্রিয়ার একটি অনুরণন ঘটে যখন আঘাতকারী ডয়টেরনের শক্তি 2·45 এমইভি ; এই ফলাফল থেকে আলফাকণার কত শক্তিতে $B^{11}(\alpha, n)N^{14}$ বিক্রিয়ার একটি অনুরণন ঘটবে নির্ণয় কর।

[9·94 এমইভি]

(9) একজন রসায়ন-বিজ্ঞানী 100 মাইক্রোগ্রাম Am^{242} পৃথক করতে সক্ষম হলেন ($T_{\frac{1}{2}} = 162$ দিন)। এই পরিমাণ আইসোটোপের ক্ষরণের হার কত হবে ? যদি এর নির্গত আলফাকণার শক্তি হয় 6·08 এমইভি তবে এক ঘণ্টায় কত পরিমাণ তাপ নির্গত হবে ?

[$7·3 \times 10^{10}$ ক্ষরণ/মিনিট, 1 ক্যালরী/ঘণ্টা]

(10) $C^{12}(d, \alpha)$ B^{10} বিক্রিয়ার ক্ষেত্রে $Q = -1·35$ এমইভি, ডয়টেরনের ন্যূনতম কত শক্তিতে এই বিক্রিয়াটি ঘটবে ? [1·57 এমইভি]

(11) একখণ্ড তামার পাতের উপর নিউট্রন বর্ষণ দ্বারা Cu^{64} আইসোটোপ উৎপন্ন করা হচ্ছে, এক্ষেত্রে বিক্রিয়াটি হ'ল $Cu^{63} + n \rightarrow Cu^{64}$ এবং এই বিক্রিয়ার প্রস্থচ্ছেদ 4·4 বার্ন। তামার পাতের বর্গায়তন 1 সেমি^{2} এবং পুরুত্ব 0·1 মিলিমিটার এবং এটি একটি পারমাণবিক চুল্লীর ভিতর আছে যেখানে নিউট্রনের ক্ষেত্রপ্রাবল্য (flux) 10^{12}/সেমি^{2}-সেকেণ্ড। কি হারে Cu^{64} আইসোটোপ উৎপন্ন হবে এবং 12·8 ঘণ্টা বর্ষণের পর Cu^{64} এর ক্রিয়াশীলতা কত হবে ? [Cu^{64} বিটাক্ষরক, এর অর্দ্ধজীবনকাল 12·8 ঘণ্টা ; তামার ঘনত্ব 8·9 গ্রাম/সি.সি.]

[আইসোটোপ উৎপাদনের হার $= 3·74 \times 10^9$/সেক
12·8 ঘণ্টার পর ক্রিয়াশীলতা $= 1·87 \times 10^9$/সেক]

একাদশ অধ্যায়

কেন্দ্রীন বিদারণ (Nuclear fission)

কেন্দ্রীন বিদারণ বিক্রিয়ার কথা পূর্ব্বে উল্লেখ করা হয়েছে, বিভিন্ন উপায়ে কেন্দ্রীনের বিদারণ ঘটান যায়। নিউট্রন অথবা অন্যান্য শক্তিশালী কণা এই বিক্রিয়ার জন্য ব্যবহৃত হতে পারে এবং বহুসংখ্যক প্রকৃতিজাত মৌলের কেন্দ্রীনে বিদারণ ঘটান সম্ভব। বর্ত্তমান অধ্যায়ে আমাদের আলোচনার মুখ্য বিষয় হবে তাপীয় নিউট্রন দ্বারা ঘটিত ইউরেনিয়ামের বিদারণ বিক্রিয়া। তাপীয় অর্থাৎ খুবই স্বল্পশক্তি সম্পন্ন নিউট্রনের দ্বারা ঘটিত বিদারণ অত্যন্ত তাৎপর্য্যপূর্ণ কারণ নিয়ন্ত্রিত পারমাণবিক শক্তি উৎপাদনের জন্য এপর্য্যন্ত বেশীর ভাগ ক্ষেত্রেই শুধু এই ধরণের বিক্রিয়াগুলিই প্রযুক্ত হয়েছে।

পারমাণবিক সংখ্যা বৃদ্ধির সাথে সাথে কেন্দ্রীনের ভিতর কুলম্ব বিকর্ষণী শক্তির প্রভাবও বৃদ্ধি পেতে থাকে। কোন একটি বৃহৎ কেন্দ্রীনের ভিতর মোট আধানের পরিমাণ অতিরিক্ত হয়ে পড়লে কেন্দ্রীনস্থ প্রোটনগুলির পারস্পরিক বিকর্ষণ এত অধিক হতে পারে যে কেন্দ্রীনের আকর্ষণী বলগুলি তখন আর কেন্দ্রকণাগুলিকে আটকে রাখতে পারে না। এর ফলে কেন্দ্রীনটি আপনা থেকেই দুটি অংশে বিচ্ছিন্ন হয়ে যেতে পারে। এই ঘটনাটিকে বলা হয় স্বতঃবিদারণ। ইউরেনিয়াম কেন্দ্রীনের স্বতঃবিদারণ ঘটে, যদিও খুব সামান্য পরিমাণে। পরীক্ষায় ইউরেনিয়ামের স্বতঃবিদারণ প্রক্রিয়ার অস্তিত্ব প্রমাণ করা সম্ভব হয়েছে, U^{238} এর ক্ষেত্রে এর দ্বারা ক্ষয়ণের অর্দ্ধজীবনকাল 6×10^{15} বছর। ইউরেনিয়াম-পারের সমস্ত কেন্দ্রীনগুলিই স্বতঃবিদারণক্ষম, এই অঞ্চলে স্বতঃবিদারণের অর্দ্ধজীবনকাল Z এর বৃদ্ধির সাথে সাথে দ্রুত কমে আসতে থাকে। উদাহরণস্বরূপ $_{94}Pu^{242}$ আইসোটোপটির স্বতঃবিদারণের অর্দ্ধজীবনকাল 7×10^{10} বছর, $_{98}Cf^{252}$ আইসোটোপের 85 বছর, $_{100}Fm^{254}$ এর 200 দিন, ইত্যাদি।

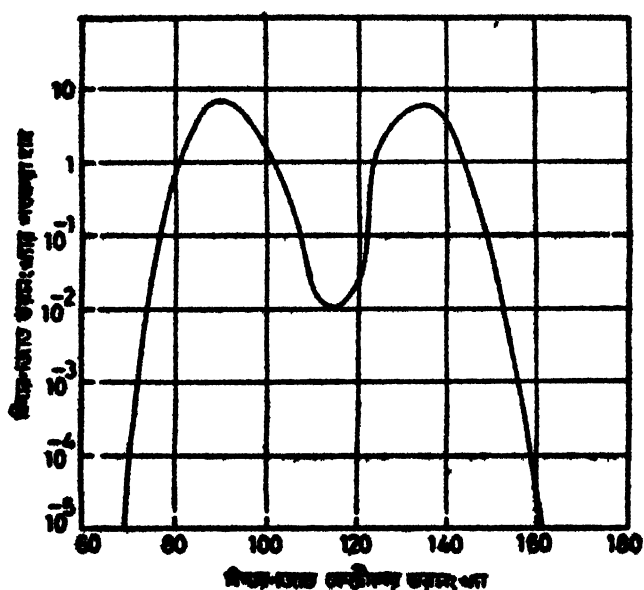
নিউট্রন বর্ষণের দ্বারা কেন্দ্রীনের যে বিদারণ বিক্রিয়া ঘটে তা প্রথম আবিষ্কার করেন অটো হ্যান এবং স্ট্রাসম্যান। এই বিজ্ঞানিদ্বয় খুব স্বল্পশক্তি সম্পন্ন নিউট্রনের দ্বারা ইউরেনিয়াম কেন্দ্রীনকে আঘাত ক'রে রাসায়নিক পরীক্ষায় প্রমাণ করেন যে এর ফলে ইউরেনিয়াম কেন্দ্রীন ভেঙ্গে গিয়ে বেরিয়াম ($Z = 56$) কেন্দ্রীন সৃষ্টি হচ্ছে। ইউরেনিয়াম

কেন্দ্রীনের সাথে তাপীয় নিউট্রনের বিক্রিয়া সম্বন্ধে প্রথম পরীক্ষা করেন ফের্মি, তাঁর উদ্দেশ্য ছিল এইভাবে ইউরেনিয়াম-পারের কেন্দ্রীন সৃষ্টি করা। এভাবে অবশ্য নেপচুনিয়াম সৃষ্টি হতে পারে কিন্তু সৃষ্ট আইসোটোপের পরিমাণ হয় অতি সামান্য কারণ $_{92}U^{238}$ এর তাপীয় নিউট্রন আহরণের প্রস্থচ্ছেদ খুবই কম। ইউরেনিয়ামকে শ্লথ নিউট্রনের সাহায্যে আঘাত ক'রে দেখা গেল যে কিছু কিছু নূতন তেজস্ক্রিয় কেন্দ্রীন সৃষ্টি হচ্ছে যাদের তেজস্ক্রিয়তার প্রকৃতি $Z=84$ থেকে $Z=92$ পর্যন্ত কোন মৌলের জ্ঞাত আইসোটোপগুলির সঙ্গে মেলে না। ফের্মি এই তেজস্ক্রিয়তার উৎসকে ইউরেনিয়াম-পারের মৌল বলেই মনে করেছিলেন যদিও বারবার প্রচেষ্টা সত্ত্বেও রাসায়নিক উপায়ে $Z=93$ মৌলটি পৃথক করা সম্ভব হ'ল না। পরিশেষে হ্যান এবং স্ট্রাসম্যান নিশ্চিতভাবে রাসায়নিক পরীক্ষার প্রমাণ করলেন যে ইউরেনিয়ামকে শ্লথ নিউট্রনের সাহায্যে আঘাত করলে যে আইসোটোপগুলির সৃষ্টি হচ্ছে তাদের মধ্যে অন্যতম হ'ল বেরিয়ামের একটি আইসোটোপ, বেরিয়াম যে তেজস্ক্রিয় করণের দ্বারা ল্যান্থা নামে রূপান্তরিত হয় তাও তাঁরা প্রমাণ করলেন। কিন্তু বেরিয়াম ও ইউরেনিয়ামের মধ্যে ভরসংখ্যা বা পারমাণবিক সংখ্যার পার্থক্য বিপুল, এথেকে প্রমাণ হ'ল যে আসলে যে বিক্রিয়াটি ঘটছে তা হ'ল ইউরেনিয়ামের বিদারণ অর্থাৎ ইউরেনিয়াম কেন্দ্রীনটি দুটি বৃহৎ অংশে বিভক্ত হয়ে ভেঙ্গে যাচ্ছে। পরে আবিষ্কৃত হয়েছে যে ইউরেনিয়ামের একটি বিশেষ আইসোটোপ, U^{235}, শ্লথ নিউট্রনের সঙ্গে বিদারণ বিক্রিয়া ঘটিয়ে থাকে। U^{235} আইসোটোপের পরিমাণ প্রাকৃতিক ইউরেনিয়ামের মধ্যে মাত্র 140 ভাগের একভাগ এবং শুধু এই সামান্য অংশেই বিদারণ বিক্রিয়া ঘটে। কিন্তু শ্লথ নিউট্রনের দ্বারা বিদারণের প্রস্থচ্ছেদ খুব বেশী বলে এত অল্প পরিমাণেও প্রচুর বিদারণ ঘটে যার ফলে বিদারণজাত পদার্থের অস্তিত্ব নিরূপণে বিশেষ অসুবিধা হয় না। U^{238} আইসোটোপটিরও বিদারণ ঘটতে পারে যদি অন্ততঃ এক এমইভির অধিক শক্তিসম্পন্ন নিউট্রনের সাহায্যে একে আঘাত করা যায়।

বিদারণ বিক্রিয়াটিকে নিম্নলিখিত উপায়ে উপস্থাপিত করা যায়

$$U^{235}+n \rightarrow U^{236} \rightarrow X+Y$$

অর্থাৎ U^{235} কেন্দ্রীনটি একটি শ্লথ নিউট্রন আহরণ ক'রে উত্তেজিত যৌগ কেন্দ্রীন U^{236}এ রূপান্তরিত হয় এবং তারপর এই উত্তেজিত কেন্দ্রীনটি অতি অল্প সময়ের মধ্যে দুটি পৃথক কেন্দ্রীনে বিভক্ত হয়ে যায় এবং তাথেকে শেষ পর্যন্ত দুটি স্থায়ী আইসোটোপ X এবং Y উৎপন্ন হয়। কেন্দ্রকণার

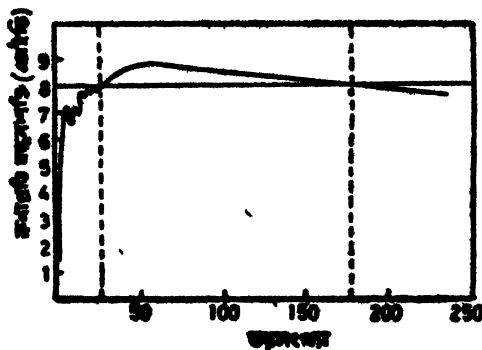
সংখ্যার সংরক্ষণ নীতির সঙ্গে সামঞ্জস্য রেখে X এবং Y যেকোন দুটি আইসোটোপ হতে পারে, তবে দেখা যায় যে কতগুলি বিশেষ বিশেষ ভরসংখ্যাবিশিষ্ট আইসোটোপে বিভক্ত হবার সম্ভাবনাই অপেক্ষাকৃত অধিক। সবচেয়ে বেশী সম্ভাব্যতা লক্ষ্য করা যায় ভরসংখ্যা 90 এবং 140 অথবা এদের খুব নিকটবর্তী ভরসংখ্যাবিশিষ্ট কেন্দ্রীনে বিদীর্ণ হবার এবং আরও দেখা গেছে যে 72এর কম বা 162এর অধিক ভরসংখ্যার কেন্দ্রীনগুলি U^{235}এর তাপীয় নিউট্রন বিদারণে সৃষ্টি হয় না। বিপ্রতিসম বিদারণের সংখ্যাই অনেক বেশী, সমান সমান ভরসংখ্যাবিশিষ্ট দুটি কেন্দ্রীনের আবির্ভাবের

চিত্র 11·1 : U^{235} কেন্দ্রীনের তাপীয় নিউট্রন দ্বারা বিদারণের ফলে উদ্ভূত বিভিন্ন ভরসংখ্যার কেন্দ্রীনের শতকরা হার।

সম্ভাবনা অনেক কম। 11·1 চিত্রে তাপীয় নিউট্রন দ্বারা U^{235}এর বিদারণের ফলে কোন একটি নির্দিষ্ট ভরসংখ্যাবিশিষ্ট আইসোটোপের আবির্ভাবের পরীক্ষালব্ধ হার কত তা লেখ এঁকে দেখান হয়েছে।

পরীক্ষায় দেখা গেছে যে বিদারণজাত আইসোটোপগুলির মধ্যে অধিকাংশই তেজস্ক্রিয়, অন্ততঃ যদি একটি আইসোটোপ স্থায়ী হয় তবে অপরটি তেজস্ক্রিয় হবেই। তুল্য ভরসংখ্যাবিশিষ্ট তিনটি কেন্দ্রীনে বিভক্ত হয়ে যাবার দুর্লভ বিদারণ বিক্রিয়াও দেখা যায়, তবে এদের সংখ্যা খুবই নগণ্য। বিদারণ বিক্রিয়াজাত তেজস্ক্রিয় আইসোটোপগুলির ইলেকট্রন

বিকিরণ করে। এছাড়া প্রতি বিদারণপিছু কিছুসংখ্যক মুক্ত নিউট্রনও উৎপন্ন হয়। বিদারণে মুক্ত নিউট্রন উৎপন্ন হওয়া একটি সর্বজনীন ঘটনা, ইউরেনিয়ামের এবং ইউরেনিয়াম পারের কেন্দ্রীনগুলির প্রত্যেক প্রকার বিদারণেই একাধিক মুক্ত নিউট্রন উৎপন্ন হতে দেখা যায়।

বিদারণোত্তর কেন্দ্রীনগুলি কেন বিটাক্ষরণশীল হয় তা সহজেই বিশ্লেষণ করা যায়। পূর্বে বলা হয়েছে (সপ্তম অধ্যায় দ্রষ্টব্য) যে সামান্য কয়েকটি স্বল্প ভরসংখ্যাবিশিষ্ট আইসোটোপ ছাড়া বাকী সমস্ত আইসোটোপগুলির মধ্যেই নিউট্রন সংখ্যা প্রোটন সংখ্যার চেয়ে বেশী হয় এবং অতিরিক্ত নিউট্রনের সংখ্যা পারমাণবিক সংখ্যা Z এর বৃদ্ধির সাথে সাথে ক্রমশঃ বৃদ্ধি পেতে থাকে, পরিশিষ্টের সারণীতে প্রদত্ত আইসোটোপগুলির নিউট্রন ও প্রোটন সংখ্যা বিচার করলেও এই উক্তির যথার্থতা লক্ষিত হবে।

চিত্র 11·2 : ভরসংখ্যার অপেক্ষক হিসাবে কণাপ্রতি গড় বন্ধনশক্তির লেখ।

ইউরেনিয়ামের বিদারণে যে কেন্দ্রীনগুলি উৎপন্ন হয় তাদের স্থায়ী আইসোটোপগুলির মধ্যে নিউট্রন ও প্রোটনের যে অনুপাত সেই তুলনায় ইউরেনিয়াম কেন্দ্রীনে নিউট্রনের অনুপাত অনেক বেশী। এথেকে বোঝা যায় কেন বিদারণের ফলে ইলেকট্রন ক্ষরণশীল তেজষ্ক্রিয় আইসোটোপের সৃষ্টি হয়, কারণ বিদারণজাত মৌলগুলির মধ্যে নিউট্রনের অনুপাত এদের স্থায়ী আইসোটোপ অবস্থার তুলনায় সাধারণতঃ যথেষ্ট অধিক থাকে। নিউট্রনের সংখ্যা অতিরিক্ত থাকায় সামান্যসংখ্যক বিদারণজাত কেন্দ্রীন সরাসরি নিউট্রন নির্গমন করে। তেজষ্ক্রিয়তার ফলে নিউট্রন নির্গমন অন্য কোথাও দৃষ্ট হয় না, শুধু বিদারণজাত কেন্দ্রীনগুলিই এই ধরণের তেজষ্ক্রিয়তা প্রদর্শন করে।

কেন্দ্রীন বিভাজন বিক্রিয়া আবিষ্কৃত হবার কিছু পরেই বোর এবং হুইলার একটি নূতন তত্ত্বকল্প প্রদান ক'রে এই বিক্রিয়ার প্রকৃতি অনেকটা

প্রাঞ্জলভাবে বিশ্লেষণ করতে সক্ষম হন। বোর-হুইলার প্রস্তাবিত তত্ত্বকে বলা হয় তরলের ফোঁটা গঠনকল্প। এই গঠনকল্প অনুসারে নিউট্রন করণোত্তর যোগ কেন্দ্রীনটি একটি তরলের ফোঁটার ন্যায় ব্যবহার করে। একটি ক্ষুদ্র তরলের ফোঁটার উপর তলাকর্ষণজনিত বলের প্রভাব খুব বেশী হয় এবং এই বলের প্রভাবে ফোঁটাটি বর্তুলাকার ধারণ করে। একটি যোগকেন্দ্রীনের ভিতরেও বহুসংখ্যক কেন্দ্রকণাগুলির পারস্পরিক পরিক্রিয়া-জনিত বলের সমগ্র প্রভাব তলাকর্ষণজনিত বলের প্রকৃতি পরিগ্রহণ করে। কিন্তু যোগকেন্দ্রীনের ভিতর সাধারণতঃ অতিরিক্ত উত্তেজনাশক্তি সঞ্চারিত থাকে যার প্রভাবে এটি প্রচণ্ডভাবে স্পন্দিত ও আলোড়িত হতে থাকে। এর আকার নানাভাবে পরিবর্তিত হতে থাকে এবং একসময় তা বর্তুলাকার থেকে এত বিচ্যুত হয়ে আসে যে তখন কেন্দ্রীনের বলগুলি আর একে স্বাভাবিক অবস্থায় ফিরিয়ে নিয়ে আসতে পারে না, এটি তখন দুটি পৃথক অংশে ভেঙ্গে যায়। কেন্দ্রীনের আকর্ষণী বল এবং কুলম্ব বিকর্ষণী বলের পারস্পরিক প্রতিযোগিতার ফলেই কেন্দ্রীনের আকৃতি পরিবর্তিত হতে থাকে এবং যোগকেন্দ্রীনের ভিতর যথেষ্ট পরিমাণে উত্তেজনাশক্তি সঞ্চারিত থাকলে এই আলোড়ন তীব্র এবং ত্বরান্বিত হয়। সে অবস্থায় অতি সামান্য সময়ের মধ্যেই কেন্দ্রীনের বিদারণ ঘটতে পারে।

আগেই বলা হয়েছে যে শুধু U^{235} কেন্দ্রীনেই খুব শ্লথ নিউট্রনের প্রভাবে বিদারণ ঘটতে পারে, এই ঘটনাটি আরেকটু বিশদভাবে পর্য্যালোচনা করার জন্য, দেখা যাক উৎপন্ন U^{236} যোগকেন্দ্রীনটি কি পরিমাণ উত্তেজনা প্রাপ্ত হয়

$$U^{235}+n \rightarrow U^{236*}$$

যেহেতু শ্লথ নিউট্রনের গতিশক্তি প্রায় শূন্য, এই বিক্রিয়ার Q-পরিমাণ অর্থাৎ U^{236*} এর উত্তেজনাশক্তি হবে

$$\begin{aligned}Q&=931{\cdot}3\times(M_{U^{235}}+M_n-M_{U^{236}})\\&=931{\cdot}3\times(235{\cdot}11865+1{\cdot}00898-236{\cdot}12076)\\&=6{\cdot}4 \text{ এমইভি}\end{aligned}$$

এইভাবে দেখান যায় যে U^{238} একটি শ্লথ নিউট্রন শোষণ করলে যোগকেন্দ্রীনের উত্তেজনাশক্তি হবে 4·9 এমইভি। কিন্তু শ্লথ নিউট্রনের দ্বারা যেহেতু U^{238} এর বিদারণ ঘটেনা, এথেকে বোঝা যায় যে সেক্ষেত্রে বিদারণের জন্য যোগকেন্দ্রীনের প্রয়োজনীয় উত্তেজনাশক্তি অন্ততঃ 4·9 এমইভির

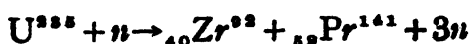
বেশী। তরলের ফোঁটা গঠনকল্পের দ্বারাও এই তথ্য সমর্থিত হয়। U^{238} কেন্দ্রীনের বিদারণের জন্য উত্তেজনাশক্তি 5 থেকে 6 এমইভির মধ্যে হওয়া প্রয়োজন। শক্তিশালী নিউট্রন ব্যবহার করলে অধিক উত্তেজনাশক্তি পাওয়া সম্ভব। এক এমইভি নিউট্রনের দ্বারা উত্তেজনাশক্তি হবে প্রায় $4·9+1=5·9$ এমইভি এবং পরীক্ষায় প্রমাণিত হয় যে এক এমইভি নিউট্রনের জন্য U^{238} এর যথেষ্ট পরিমাণে বিদারণ প্রস্থচ্ছেদ রয়েছে।

প্রোটনের দ্বারা ইউরেনিয়ামের বিদারণ ঘটাতে হলে যেকোন আইসোটোপের জন্যই অধিক শক্তির প্রোটন ব্যবহার করা প্রয়োজন, কারণ প্রোটনের ক্ষেত্রে ইউরেনিয়ামের কুলম্ব প্রতিরোধ প্রায় 12 এমইভি। অবশ্য পূর্ববর্তী আলোচনা থেকে আমরা বলতে পারি যে এর চেয়ে কম শক্তিসম্পন্ন প্রোটন এই প্রতিরোধ অতিক্রম ক'রে ইউরেনিয়াম কেন্দ্রীনের সঙ্গে বিক্রিয়া করতে পারে, কিন্তু প্রতিরোধ অতিক্রমণের সম্ভাব্যতা প্রোটনের শক্তি হ্রাসের সঙ্গে সঙ্গে দ্রুত কমে যায়, 7 এমইভির কম শক্তির প্রোটনের দ্বারা ইউরেনিয়ামের বিদারণ প্রস্থচ্ছেদ খুবই সামান্য। শক্তিশালী আলফাকণা এবং ডিউটেরনের সাহায্যেও ইউরেনিয়ামের বিদারন ঘটতে পারে। 17·5 এমইভি গামারশ্মির দ্বারা U^{238} কেন্দ্রীনের বিদারণ ঘটতে দেখা গেছে কিন্তু এক্ষেত্রেও প্রস্থচ্ছেদ অত্যন্ত কম, মাত্র 0·003 বার্ন। 350 এমইভি প্রোটন ব্যবহার ক'রে বহুসংখ্যক মৌলের বিদারণ ঘটান সম্ভব হয়েছে, এমনকি যেসব মৌলের ভরসংখ্যা 50এর নিকটবর্তী সেগুলির ভিতরও এইভাবে বিদারণ ঘটে। তবে এইসব বিদারণের Q-পরিমাণ ঋণরাশি, সাধারণতঃ—50 এমইভির চেয়েও কম, সুতরাং এদের জন্য অতিরিক্ত শক্তি বাইরে থেকে সরবরাহ করতে হয় এবং এজন্যই এত অধিক শক্তিসম্পন্ন প্রোটনের প্রয়োজন হয়।

বিদারণজাত শক্তি

কেন্দ্রীনের বিদারণের ফলে বিপুল পরিমাণে শক্তি নির্গত হয় এবং এই শক্তি নির্গমনের সাহায্য নিয়েই পারমাণবিক বোমা ও পারমাণবিক শক্তিকেন্দ্র নির্মাণ সম্ভব হয়েছে। ইউরেনিয়ামের বিদারণে কেন বিপুল পরিমাণ শক্তি নির্গত হয় তা নিম্নোক্ত আলোচনা থেকে বোঝা যাবে। কেন্দ্রীনের মোট বন্ধনশক্তি ও কণাপ্রতি বন্ধনশক্তির সংজ্ঞা আমরা আগে দিয়েছি, 11·2 চিত্রে বিভিন্ন কেন্দ্রীনের কণাপ্রতি বন্ধনশক্তির পরিমাণ বনাম এদের ভরসংখ্যার লেখ অঙ্কন করা হয়েছে, দেখা যাচ্ছে যে প্রথমদিকে বন্ধনশক্তি ভরসংখ্যার

সাথে সাথে গড়ে দ্রুত বৃদ্ধি পেয়ে চলেছে, যদিও এই অঞ্চলে বিশেষ বিশেষ আইসোটোপের ক্ষেত্রে বন্ধনশক্তির বেশ কিছু হ্রাসবৃদ্ধিও লক্ষ্য করা যায়। তারপর ভরসংখ্যা 50এর কাছাকাছি এসে কণাপ্রতি বন্ধনশক্তির পরিমাণ এক চরমাবস্থায় পৌঁছয়, তারপর আবার ক্রমশঃ সন্তভাবে হ্রাস পেতে থাকে। লেখটির প্রকৃতি দেখে বোঝা যায় যে, ইউরেনিয়ামের বিদারণে যে কেন্দ্রীনগুলি উৎপন্ন হয় তাদের কণাপ্রতি বন্ধনশক্তি ইউরেনিয়ামের কণাপ্রতি বন্ধনশক্তির চেয়ে বেশী, কারণ উৎপন্ন আইসোটোপগুলির ভরসংখ্যা প্রতিক্ষেত্রেই 50এর অধিক। সুতরাং ইউরেনিয়াম কেন্দ্রীন যখন বিদারণের ফলে দুটি অংশে বিভক্ত হয়ে যায় তখন ক্ষরণোত্তর মোট বন্ধনশক্তির পরিমাণ বৃদ্ধি পায় এবং ঐ তুল্য পরিমাণের শক্তি বিদারণের ফলে নিঃসারিত হয়। U^{235} এর ভর এবং বিদারণোত্তর কেন্দ্রীনগুলির ও নিউট্রনের মধ্যে ভরের পার্থক্য থেকে নির্গত শক্তির পরিমাণ সহজেই গণনা করা যায়। উদাহরণ হিসাবে নিম্নলিখিত বিক্রিয়াটির কথা ধরা যাক :

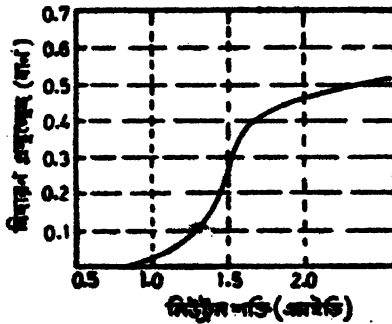
$$U^{235}+n \rightarrow {}_{40}Zr^{92}+{}_{59}Pr^{141}+3n$$

আমরা যদি মোট বিক্রিয়াশীল ও বিক্রিয়ালব্ধ ভরের পরিমাণ তুলনা করি তবে দেখি

U^{235}	235·11865	${}_{59}Pr^{141}$	140·95318
n	1·00898	${}_{40}Zr^{92}$	91·93551
	236·12764		
		$3n$	3·02695
			235·91564

উভয়দিকের ভরসমষ্টির মধ্যে পার্থক্য 0·212 ভর একক বা 197 এমইভি, সুতরাং এই বিদারণ বিক্রিয়াটি থেকে ঠিক এই পরিমাণ শক্তি নির্গত হবে, অর্থাৎ 197 এমইভি হ'ল এই বিক্রিয়াটির Q পরিমাণ। P_r^{141} এবং Z_r^{92} উভয়ই স্থায়ী আইসোটোপ, অর্থাৎ এই উদাহরণে বিদারণের দ্বারা উৎপন্ন কেন্দ্রীনগুলির একাধিক বিটাক্ষরণ ঘটার পর শেষ পর্যন্ত যে স্থায়ী আইসোটোপগুলি উৎপন্ন হয় সেগুলির ভর বিবেচনা করা হয়েছে, এজন্যই দু'পাশের মোট আধানের পরিমাণ পরস্পর সমান নয়। বিদারণের ফলে নিঃসারিত মোট শক্তি বিদারণোত্তর কেন্দ্রীন ও নিউট্রনগুলির গতিশক্তি এবং এদের ক্ষরণজাত গামারশ্মি ও বিটাকণাগুলির মোট শক্তি হিসাবে প্রকাশ পায়। 11·2 লেখটি থেকে দেখা যায় যে ইউরেনিয়ামের তুলনায় কম ভরসংখ্যাবিশিষ্ট কিছু কিছু কেন্দ্রীনের বিদারণ ঘটলেও তাথেকে যথেষ্ট পরিমাণে শক্তি নিঃসারিত হতে

পারে। কিন্তু ইউরেনিয়াম ও প্লুটোনিয়ামে যেরকম তাপীয় নিউট্রনের দ্বারা বিদারণ ঘটে, ঐসকল স্বল্পতর ভরসংখ্যার কেন্দ্রীনে তা লক্ষ্য করা যায় না। সেসব ক্ষেত্রে অধিক উত্তেজনাশক্তির প্রয়োজন ঘটে এজন্য শুধু তীব্র শক্তি-সম্পন্ন কণার দ্বারাই বিদারণ সম্ভব।

নিউট্রন প্রস্থচ্ছেদ

নিউট্রনঘটিত বিভিন্ন ধরণের বিক্রিয়ার প্রস্থচ্ছেদের জ্ঞান পরমাণু বিজ্ঞানের প্রয়োগ এবং গবেষণার ক্ষেত্রে অত্যন্ত প্রয়োজনীয়। পারমাণবিক চুল্লী নির্ম্মাণের জন্য 2 এমইভির কম শক্তিসম্পন্ন নিউট্রনগুলির ইউরেনিয়ামের বিভিন্ন আইসোটোপের সঙ্গে আহরণ ও বিদারণ বিক্রিয়ার প্রস্থচ্ছেদ খুব ভালভাবে জানা থাকা দরকার। সামরিক কারণে অনেকসময় এইসব প্রস্থচ্ছেদের পরিমাণ এবং নিউট্রনের শক্তির সঙ্গে এদের পরিবর্ত্তনের প্রকৃতি গোপন রাখা হ'ত। তবে এপর্য্যন্ত যেসব প্রস্থচ্ছেদের পরিমাণ জানা গিয়েছে তাদের সাহায্যে পারমাণবিক চুল্লীর গঠন ও ক্রিয়াপদ্ধতি ভালভাবেই ব্যাখ্যা

চিত্র 11·3 : U^{238}এর বিদারণ প্রস্থচ্ছেদ।

করা যায়। বিশেষভাবে প্রয়োজনীয় হ'ল 0·05 এমইভির নীচে তাপীয় শক্তিতে U^{235} এর প্রস্থচ্ছেদের পরিমাণ, কারণ তাপীয় শক্তিতেই U^{235} এর বিদারণ-প্রস্থচ্ছেদ সর্ব্বাধিক হয় এবং পারমাণবিক চুল্লীকে সাফল্যজনক-ভাবে চালাতে নিউট্রনগুলিকে ঐ শক্তিতে আনয়নের প্রয়োজন হয়। U^{238} আইসোটোপটির বিদারণ আরম্ভ হয় প্রায় 1 এমইভি শক্তির নিউট্রনের দ্বারা, তারপর বিদারণের প্রস্থচ্ছেদ নিউট্রনের শক্তির সঙ্গে সঙ্গে ধীরে ধীরে বৃদ্ধি পেতে থাকে যেমন দেখান হয়েছে 11·3 লেখচিত্রটিতে। বিদারণজাত নিউট্রনগুলির শক্তি গড়ে 2 এমইভির মত হয় কিন্তু এই শক্তিতে U^{238} এর বিদারণ-প্রস্থচ্ছেদ 0·5 বার্নেরও কম। তাপীয় নিউট্রনের দ্বারা U^{238} এর

বিদারণ ঘটে না। U^{238} এর বিদারণ-প্রস্থচ্ছেদ 5 এমইভি নিউট্রন শক্তিতেও এক বার্নের নীচে থাকে। প্রস্থচ্ছেদ নেহাৎই কম হবার দরুণ পারমাণবিক চুল্লীতে এই আইসোটোপটি জ্বালানী হিসাবে ব্যবহার করা যায় না। স্বল্পশক্তিতে U^{235} এর বিদারণ-প্রস্থচ্ছেদ মোটামুটি $1/v$ নীতিতে পরিবর্তিত হয়, v নিউট্রনের গতিবেগ, অর্থাৎ শ্লথ নিউট্রনগুলির বিদারণের প্রস্থচ্ছেদ খুবই বেশী।

11·1 সারণীতে বিভিন্ন আইসোটোপের তাপীয় নিউট্রনঘটিত বিদারণের প্রস্থচ্ছেদ দেওয়া হয়েছে, এই পরিমাণগুলি 0·05 ইভির নীচে সবচেয়ে সম্ভাব্য শক্তিতে প্রস্থচ্ছেদের পরিমাণকে নির্দেশ করে (তাপীয় অঞ্চলে নিউট্রনগুলির ম্যাক্সওয়েলীয় গতিবেগ বিতরণ থাকে এরকম ধ'রে নেওয়া হয়েছে, এই অবস্থায় প্রায় সমস্ত নিউট্রনগুলির শক্তি 0·05 ইভির নীচে থাকে, তখন এদের সবচেয়ে সম্ভাব্য গতিবেগের পরিমাণ হয় 2,200 মিটার/সেকেণ্ড)। আহরণ-প্রস্থচ্ছেদ শক্তির সঙ্গে সঙ্গে দ্রুত পরিবর্তিত হয় না, এজন্য গড় শক্তিতে এর পরিমাণ নির্দেশ করা হয়েছে।

তাপীয় শক্তির উর্দ্ধে বিভিন্ন শক্তিতে U^{238} আইসোটোপের নিউট্রন আহরণ-প্রস্থচ্ছেদের জ্ঞান পারমাণবিক চুল্লী নির্ম্মাণের পক্ষে অত্যন্ত প্রয়োজনীয়। পরীক্ষার দ্বারা জানা যায় যে 7 ইভি থেকে আরম্ভ ক'রে 1000 ইভি পর্য্যন্ত নিউট্রনশক্তিতে U^{238} এর আহরণ-প্রস্থচ্ছেদ খুবই বেশী, প্রস্থচ্ছেদ অবশ্য সর্ব্বত্র সমান নয়, মাঝে মাঝে অনুরণন আহরণের তীক্ষ্ণ শিখর লক্ষিত হয়। পারমাণবিক চুল্লীর অভ্যন্তরে নিউট্রনগুলি যখন এইসব শক্তি অঞ্চলে থাকে তখন যাতে এরা U^{238} এর সংস্পর্শে না আসতে পারে তার জন্য বিশেষ ব্যবস্থা অবলম্বন করতে হয়।

সারণী 11·1 : তাপীয় নিউট্রন প্রস্থচ্ছেদ (বার্ন)

আইসোটোপ	বিদারণ-প্রস্থচ্ছেদ (σ_f)	গড়শক্তিতে আহরণ-প্রস্থচ্ছেদ (σ_c)
U^{235}	580	101
U^{238}	0	2·71
প্রকৃতিলব্ধ ইউরেনিয়াম	4·12	3·51
$_{94}Pu^{239}$	742	274
Pu^{241}	950	425
Th^{232}	0	7·4
U^{233}	524	56

বিলম্বিত (delayed) নিউট্রন

প্রতি বিদারণপিছু কিছুসংখ্যক মুক্ত নিউট্রন উৎপন্ন হয় তা আমরা আগেই বলেছি, এই নিউট্রনগুলির সৃষ্টি হয় সাধারণতঃ বিদারণজাত উত্তেজিত কেন্দ্রীনগুলির নিউট্রন ক্ষরণের দ্বারা, এই কেন্দ্রীনগুলির ভিতর যে নিউট্রনের আধিক্য থাকে থাকে তা পূর্ব্বে আলোচনা করা হয়েছে। এই ধরণের নিউট্রন ক্ষরণের নির্দিষ্ট অর্দ্ধজীবনকাল রয়েছে, তবে অধিকাংশ নিউট্রনই খুব দ্রুত ক্ষরিত হয়, পরীক্ষা ক'রে প্রমাণ করা সম্ভব হয়েছে যে প্রায় 10^{-14} সেকেণ্ডের মধ্যেই বিদারণজাত কেন্দ্রীনগুলি থেকে এইসকল নিউট্রনের ক্ষরণ সমাপ্ত হয়ে যায়। U^{235} এর বিদারণে গড়ে 2·5টি নিউট্রন উৎপন্ন হয়, এদের শক্তি 1 থেকে 3·5 এমইভির মধ্যে বিস্তারিত থাকতে দেখা যায়, তবে অধিকতর শক্তির নিউট্রনের সংখ্যা কম, গড় শক্তির পরিমাণ প্রায় 2 এমইভি থাকে।

কিন্তু এছাড়া আরও এক শ্রেণীর নিউট্রন বিদারণের ফলে সৃষ্টি হয় যাদের ক্ষেত্রে নিউট্রন ক্ষরণের অর্দ্ধজীবনকাল অপেক্ষাকৃত অনেক বেশী, এদের বলা হয় বিলম্বিত নিউট্রন। বিলম্বিত নিউট্রনগুলির সংখ্যা মোট উৎপন্ন নিউট্রনগুলির তুলনায় নগণ্য (0·64%), কিন্তু তাহলেও আমরা পরে দেখতে পাব, এদের উপস্থিতি পারমাণবিক চুল্লীর সাফল্যজনক ক্রিয়ার পক্ষে অপরিহার্য্য। বিভিন্ন বিদারণে উৎপন্ন বিলম্বিত নিউট্রন সৃষ্টির অর্দ্ধজীবনকাল 0·05 সেকেণ্ড থেকে 55 সেকেণ্ড পর্য্যন্ত হতে পারে, তবে U^{235} এর বিদারণে উদ্ভূত নিউট্রনগুলির আবির্ভাব অধিকাংশই বিদারণ ঘটার 15 সেকেণ্ডের মধ্যেই সমাপ্ত হয়ে যায়। বিলম্বিত নিউট্রনদের অর্দ্ধজীবনকাল মাপা অপেক্ষাকৃত কঠিন কারণ বিদারণ ঘটার খুব অল্প সময়ের মধ্যেই পরিমাপের কাজ শেষ করতে হবে। তাছাড়া পরীক্ষাধীন ইউরেনিয়ামকে খুব অল্প সময়ের জন্য অত্যধিক তীব্র নিউট্রন প্রবাহের দ্বারা আঘাত করতে হবে যাতে স্বল্প সময়ের মধ্যেই যথেষ্ট পরিমাণ বিদারণ ঘটে এবং ক্ষরিত নিউট্রনের সংখ্যা পরিমাপযোগ্য হয়। তবে পারমাণবিক চুল্লীর সহায়তায় এইসব পরীক্ষা অপেক্ষাকৃত সহজে করা যায়। ইউরেনিয়ামকে চুল্লীর ভিতর সামান্য সময়ের জন্য অত্যন্ত তীব্র তাপীয় নিউট্রন প্রবাহ ধারার সম্মুখীন করা হয় এবং এরপর এক সেকেণ্ডের ভগ্নাংশের মধ্যেই এটি বাইরে একটি নিউট্রন গণনকারের সামনে নিয়ে আসা হয় এবং সেখানে এর নিউট্রন তেজস্ক্রিয়তা পরিমাপ করা হয়। গণনকারটি ক্যাডমিয়ামের পাত দ্বারা আবৃত থাকে যা একই সঙ্গে আলফাকণা, বিটাকণা এবং খুব শ্লথ নিউট্রনকে শোষণ করতে পারে, বিদারণোত্তর ইউরেনিয়ামের চারপাশেও ক্যাডমিয়ামের আস্তরণ রাখা হয়। সুতরাং

এই পরীক্ষায় শুধু ইউরেনিয়ামের বিদারণজাত শক্তিশালী নিউট্রনগুলিই গণনকারের ভিতর লক্ষিত হবে। হাইড্রোজেন বা হিলিয়াম গ্যাসপূর্ণ আয়নীভবন কক্ষ অপেক্ষাকৃত শক্তিশালী নিউট্রন পর্য্যবেক্ষণের জন্য বিশেষ উপযোগী, কারণ শক্তিশালী নিউট্রনের আঘাতে প্রোটন বা হিলিয়াম যথেষ্ট ভরবেগ অর্জন ক'রে কক্ষের ভিতর উপযুক্ত পরিমাণে আয়নীভবনের সৃষ্টি করতে পারে।

হ্রাসক পদার্থ (moderator)

যেসমস্ত পদার্থের ভিতর একটি শক্তিশালী নিউট্রন ক্রমাগত সংঘর্ষের দ্বারা অতিক্রুত শক্তিক্ষয় করে তাদের বলা হয় হ্রাসক পদার্থ, পারমাণবিক চুল্লীর গঠনে এদের গুরুত্বপূর্ণ ভূমিকা রয়েছে। U^{235} এর বিদারণে যে নিউট্রনগুলির সৃষ্টি হয় তাদের গড় শক্তি 2 এমইভি, হ্রাসকের কেন্দ্রীনগুলির সঙ্গে ক্রমাগত সংঘর্ষের ফলে যখন এই শক্তির পরিমাণ হ্রাস পেয়ে 0·05 ইভির চেয়েও কম হয়ে পড়ে তখনই এই নিউট্রনগুলি পুনরায় U^{235} এর ভিতর যথেষ্ট পরিমাণে বিদারণ ঘটাতে সক্ষম হবে। নির্দিষ্ট তাপমাত্রায় হ্রাসকের একটি পরমাণুর যে তাপীয় শক্তি থাকে, ক্রমাগত শক্তিক্ষয় করার ফলে নিউট্রনের শক্তি যখন সেই শক্তির সমান হয়ে পড়ে সেই অবস্থায় নিউট্রনকে তাপীয় নিউট্রন (thermal neutron) আখ্যা দেওয়া হয়। এই শক্তির পরিমাণ সহজেই গণনা করা যায়, ধরা যাক গ্রাফাইটের ভিতর 27°C তাপমাত্রায় একটি তাপীয় নিউট্রনের শক্তি ; এই তাপমাত্রায় একটি কার্বন পরমাণুর গড় শক্তি হবে

$$E=\tfrac{3}{2}kT$$

T পরম তাপমাত্রা, T = 300°K। তাপীয় নিউট্রনের শক্তিও ঠিক এই পরিমাণের সমান অর্থাৎ

$$E=\frac{1\cdot38\times10^{-16}\times300}{1\cdot6\times10^{-12}}\times\tfrac{3}{2}=0\cdot039 \text{ ইভি}$$

এই শক্তির পরিমাণ আরও কম হবে যদি আমরা পরমাণুগুলির গড় শক্তির পরিবর্তে এদের সবচেয়ে সম্ভাব্য শক্তি ($E=kT$, 1·8 সমন্ধ) বিচার করি। এইসকল শক্তিতে U^{235} এর বিদারণ-প্রস্থচ্ছেদ যথেষ্ট অধিক হয়।

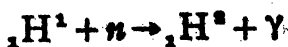
হ্রাসকের কেন্দ্রীনগুলির ভরসংখ্যা যত কম হয় প্রতি সংঘর্ষে নিউট্রনের শক্তিহ্রাসের পরিমাণও তত বেশী হয়, শক্তি ও ভরবেগ সংরক্ষণের নীতি প্রয়োগ ক'রে এই ঘটনাটি সহজেই ব্যাখ্যা করা যায়। নিউট্রন সংঘাতের বিস্তৃত গাণিতিক বিশ্লেষণ পরিশিষ্ট 1-এর ভিতর আলোচনা করা হয়েছে। প্রতি

সংঘর্ষপিছু একটি নিউট্রন গড়ে এর শক্তির কত অংশ ক্ষয় করে তার বর্ণনা এতে আছে, এছাড়া বিভিন্ন পদার্থের ভিতর একটি নিউট্রনকে তাপীয় শক্তিতে আনয়নের জন্য মোট যতগুলি সংঘর্ষ ঘটায় প্রয়োজন সেই সংখ্যা গণনা করার পদ্ধতিও নির্দেশ করা হয়েছে, এই গণনার সাহায্য নিয়েই 11·2 সারণীর সর্বশেষ সোপানের সংখ্যাগুলি নির্ণয় করা হয়েছে। ঐ গণনা থেকে স্পষ্টই দেখা যায় যে যেসব কেন্দ্রীনের ভর নিউট্রনের তুলনায় খুবই বেশী তাদের সঙ্গে প্রতি সংঘর্ষে নিউট্রনটি অতি অল্পই শক্তি ক্ষয় করে। নিউট্রনের শক্তিহ্রাসের উপযোগী মাধ্যম হ'ল লঘু-কেন্দ্রীনবিশিষ্ট পদার্থ, যেমন হাইড্রোজেন বা সেইসব পদার্থ যাদের ভিতর হাইড্রোজেন বা ডিউটেরিয়ামের পরিমাণ খুব বেশী—যেমন মোম, জল, ভারী জল, ইত্যাদি। তাছাড়া কার্বন এবং বেরিলিয়ামও একাজে বিশেষ উপযোগী। দেখান যায় যে হাইড্রোজেন কেন্দ্রীনের সঙ্গে পরপর দশটি সংঘর্ষে নিউট্রনের শক্তি প্রাথমিক শক্তির 1000 ভাগের এক ভাগ হয়ে পড়ে, কিন্তু সীসার কেন্দ্রীনের সঙ্গে দশটি সংঘর্ষে শক্তিহ্রাসের পরিমাণ হয় প্রাথমিক শক্তির মাত্র শতকরা সামান্য কয়েক ভাগ।

পরিশিষ্ট 1 এর আলোচনা অনুসারে যদি আমরা শুধু সংঘর্ষপিছু শক্তিক্ষয়ের ভিত্তিতে বিচার করি তাহলে অবশ্য মনে হবে যে হাইড্রোজেনই বোধ হয় সর্ব্বাপেক্ষা উত্তম হ্রাসক পদার্থ। কিন্তু আসলে তা নয় এবং এর মধ্যে আরও কতগুলি অত্যন্ত প্রয়োজনীয় বিচার্য্য বিষয় রয়েছে। প্রথমতঃ, উত্তম হ্রাসক পদার্থ হতে হলে ঐ পদার্থের কেন্দ্রীনগুলির সঙ্গে নিউট্রনের সংঘর্ষ ঘটার সম্ভাবনা খুব বেশী হওয়া প্রয়োজন, এই সম্ভাবনা নির্ভর করে পদার্থের ভিতর কেন্দ্রীনের ঘনত্বের উপর, ঘনত্ব যত বেশী হবে তত বেশী সংঘর্ষ ঘটতে থাকবে। এই কারণেই গ্যাসীয় হাইড্রোজেন বা হিলিয়াম হ্রাসক হিসাবে উপযুক্ত নয়, যদিও সংঘর্ষপিছু গড় শক্তিক্ষয়ের পরিমাণ এদের কেন্দ্রীনগুলির ক্ষেত্রে খুবই বেশী।

দ্বিতীয়তঃ, হ্রাসক পদার্থের কেন্দ্রীনগুলির নিউট্রনের সঙ্গে বিক্ষুরণ প্রক্রিয়ার প্রস্থচ্ছেদ অধিক হওয়া বাঞ্ছনীয়, তা না হলে সংঘর্ষের সংখ্যা হবে প্রয়োজনের তুলনায় কম। অধিক ঘনত্ব এবং অধিক বিক্ষুরণ-প্রস্থচ্ছেদ উভয়ই সংঘর্ষ ঘটার সম্ভাবনা বাড়িত করে, কিন্তু এরা একে অন্যের নিরপেক্ষ।

তৃতীয়তঃ, হ্রাসকের কেন্দ্রীনগুলির সঙ্গে নিউট্রনের আহরণ বিক্রিয়ার প্রস্থচ্ছেদ খুবই কম হওয়া বাঞ্ছনীয়। প্রোটন নিউট্রনের সঙ্গে বিকিরণাত্মক আহরণ ক্রিয়ার অংশগ্রহণ করে, শ্লথ নিউট্রনের সঙ্গে নিম্নলিখিত বিক্রিয়াটি অতি দ্রুত ঘটতে দেখা যায়

$$_1H^1 + n \rightarrow {_1H^2} + \gamma$$

এই প্রক্রিয়ার দ্বারা নিউট্রনের সংখ্যা দ্রুত হ্রাস পায় এবং প্রধানতঃ এজন্যই পারমাণবিক চুল্লীতে হ্রাসক হিসাবে হাইড্রোজেনবহুল পদার্থ সাধারণতঃ ব্যবহৃত হয় না। নিউট্রন সংরক্ষণ পারমাণবিক চুল্লী নির্মাণের একটি প্রধান সমস্যা, যেসমস্ত উপায়ে নিউট্রন বিনষ্ট হয়ে যেতে পারে সেগুলির প্রত্যেকটিরই যথাসাধ্য প্রতিবিধান করা একান্ত প্রয়োজন।

11·2 সারণীতে বিভিন্ন হ্রাসক পদার্থের ধর্ম্মাবলী বিবৃত করা হয়েছে, এখানে তাপীয় নিউট্রনের সবচেয়ে সম্ভাব্য শক্তিতে বিভিন্ন প্রস্থচ্ছেদের পরিমাণ নির্দ্দেশ করা হয়েছে, সর্ব্বশেষ সোপানে একটি নিউট্রনকে 2 এমইভি শক্তি থেকে 0·025 এমইভি শক্তিতে আনয়নের জন্য বিভিন্ন হ্রাসকের ভিতর মোট যতগুলি সংঘর্ষের প্রয়োজন হয় তা লিপিবদ্ধ করা হয়েছে। এই সারণী থেকে দেখা যায় যে ডিউটেরন (ভারী জল হিসাবে) হ্রাসক হিসাবে বিশেষ উপযোগী, কারণ এর আহরণ-প্রস্থচ্ছেদ খুব কম, বিক্ষুরণ-প্রস্থচ্ছেদ যথেষ্ট বেশী এবং অল্পসংখ্যক সংঘর্ষেই নিউট্রনগুলি এর ভিতর তাপীয় শক্তিতে উপনীত হয়। হিলিয়ামও হ্রাসক হিসাবে ব্যবহৃত হতে পারত যদি একে যৌগ হিসাবে পাওয়া সম্ভব হ'ত। অন্যান্য পদার্থের মধ্যে বেরিলিয়াম ও কার্ব্বন একাজের পক্ষে বিশেষ উপযোগী। গ্রাফাইট হিসাবে কার্ব্বনের ব্যবহার খুবই বেশী কারণ চুল্লীর ভিতর গ্রাফাইট সহজেই নির্দ্দিষ্ট পরিকল্পনা অনুযায়ী সাজান যায়, এবং কঠিন, তীব্র তাপসহ ও রাসায়নিক নিষ্ক্রিয় পদার্থ হিসাবে এর গুণাগুণ অন্যান্য পদার্থের তুলনায় অনেক ক্ষেত্রেই অধিক কাম্য।

সারণী 11·2

মৌল	বিক্ষুরণ-প্রস্থচ্ছেদ (বার্ন)	আহরণ-প্রস্থচ্ছেদ (বার্ন)	সংঘর্ষ পিছু শক্তিক্ষয় ($\Delta E/E$)	সংঘর্ষের সংখ্যা
H^1	38	0·33	0·63	18
D^2	7	0·0005	0·52	25
He^4	1	0	0·35	42
Li	1·4	71	0·27	67
Be^9	7	0·01	0·18	87
B	4	755	0·17	98
C^{12}	4·8	0·0032	0·14	114
N	10	1·8	0·12	132
O	4·2	<0·0002	0·11	150

অপর একটি লক্ষণীয় বিষয় হচ্ছে এই যে, ভারী জলের ভিতর অপেক্ষাকৃত অল্পসংখ্যক সংঘর্ষের ফলেই নিউট্রন তাপীয় শক্তিতে নীত হয়, এর অর্থ হচ্ছে যে মন্থভবনের (slowing down) সময় নিউট্রনকে বেশীদূর ভ্রমণ করতে হয় না। পারমাণবিক চুল্লীর ক্ষেত্রে এর তাৎপর্য্য হ'ল এই যে, ভারী জল হ্রাসক হিসাবে ব্যবহৃত হলে চুল্লীর আয়তন অপেক্ষাকৃত কম হবে। গ্রাফাইটের ক্ষেত্রে তাপীয় শক্তিতে আনয়নের জন্য সংঘর্ষের সংখ্যা হয় 100এর অধিক, সুতরাং নিউট্রনের মোট ভ্রমণপথ এবং সেইহেতু গ্রাফাইট চুল্লীর আয়তন অপেক্ষাকৃত অধিক হতে হবে।

পারমাণবিক শক্তি উৎপাদন

পরীক্ষাগারে যদিও পরমাণু বিদারণ বিক্রিয়া অপেক্ষাকৃত সহজেই লক্ষ্য করা যায় কিন্তু এই বিক্রিয়া ব্যাপকভাবে প্রয়োগ ক'রে তাথেকে ব্যবহারিক ভিত্তিতে শক্তি উৎপাদন করা অবশ্যই একটি অত্যন্ত জটিল কাজ। এই সমস্যা সমাধানের প্রথম পদক্ষেপ হ'ল পারমাণবিক চুল্লী। পারমাণবিক চুল্লী বলতে বোঝায় একটি কক্ষ যেখানে বিপুল পরিমাণ ইউরেনিয়াম পিণ্ডের ভিতর ব্যাপকভাবে এবং স্বয়ংক্রিয়ভাবে ক্রমাগত বিদারণ বিক্রিয়া ঘটে চলেছে। পারমাণবিক চুল্লীর ভিতর বাইরে থেকে নিউট্রন সরবরাহের কোন প্রয়োজন হয় না, চুল্লী বিদারণ বিক্রিয়ার সাহায্যে নিজেই প্রয়োজনীয় নিউট্রন উৎপন্ন করে, পরে এদের তাপীয় শক্তিতে আনয়ন ক'রে পুনরায় বিদারণ বিক্রিয়া সংঘটিত হয়। বিদারণ বিক্রিয়ার ফলে প্রচুর শক্তি উৎপন্ন হয় এজন্য পারমাণবিক চুল্লী একটি তাপের উৎস হিসাবে কাজ করে। তবে চুল্লীর ভিতর বিক্রিয়া নিয়ন্ত্রণ করা যায়, অর্থাৎ ইচ্ছামত এই বিক্রিয়া শুরু করা বা বিক্রিয়ার হার পরিবর্ত্তিত করা কিংবা থামিয়ে দেওয়া যায়। অত্যধিক তাপ-উৎপাদনক্ষম পারমাণবিক চুল্লী থেকে যে তাপ পাওয়া যায় তার সাহায্যে উচ্চ চাপের জলীয় বাষ্প উৎপন্ন ক'রে সেই বাষ্পের দ্বারা টারবাইন ঘুরিয়ে বিদ্যুৎশক্তি উৎপাদন সম্ভব, পারমাণবিক বিদ্যুৎকেন্দ্রগুলি এই পদ্ধতিতে কাজ করে।

পারমাণবিক চুল্লীর অভ্যন্তরে যেভাবে স্বয়ংক্রিয়ভাবে ক্রমাগত বহুসংখ্যক কেন্দ্রীনের বিদারণ ঘটতে থাকে তাকে বলা হয় শিকল বিক্রিয়া। U^{235} এর বিদারণে 2·5টি মুক্ত নিউট্রন উৎপন্ন হয় এবং এদের গড়-শক্তি থাকে 2 এমইভি, এই নিউট্রনগুলি হ্রাসকের ভিতর দ্রুত শক্তিক্ষয় ক'রে তাপীয় অবস্থায় উপনীত হয় এবং পুনরায় অন্য U^{235} কেন্দ্রীনে বিদারণ ঘটায়।

এইভাবে যদি প্রত্যেক বিদারণ থেকে একাধিক তাপীয় নিউট্রন পাওয়া যেতে থাকে তবে চুল্লীর ভিতর বিদারণের সংখ্যা এবং নিউট্রন সংখ্যা ক্রমশঃ বৃদ্ধি পেতে থাকবে। এই ধরণের বিক্রিয়া চক্রকেই বলা হয় শিকল বিক্রিয়া অর্থাৎ একটি বিক্রিয়ার ফলস্বরূপ এক বা একাধিক নূতন বিক্রিয়া ঘটে এবং এইভাবে ক্রমাগত চলতে থাকে। যেহেতু প্রতি বিদারণের ফলে চুল্লীর ভিতর নিউট্রন সংখ্যা বৃদ্ধি পায়, শীঘ্রই এমন অবস্থার সৃষ্টি হতে পারে যে তখন অতিরিক্ত বিদারণের ফলে অত্যন্ত দ্রুত গতিতে তাপ সৃষ্টি হবে এবং তা শেষ পর্য্যন্ত চুল্লীর ভিতর এক বিস্ফোরণাত্মক অবস্থার সৃষ্টি করবে। তবে অন্যান্য আরও কতগুলি প্রক্রিয়া ঘটে যেগুলির দ্বারা চুল্লীর ভিতর নিউট্রন সংখ্যা হ্রাস পায়, এগুলির সাহায্যে নিউট্রনের সমতা রক্ষিত হয়। যেমন কিছু নিউট্রন চুল্লী গঠনকারী পদার্থের ভিতর শোষিত হয়ে কিংবা চুল্লীর দেওয়ালের ভিতর দিয়ে গড়িয়ে গিয়ে নষ্ট হয়ে যায়। এর পরও যদি অতিরিক্ত নিউট্রন উৎপন্ন হতে থাকে তবে চুল্লীর ভিতর কোন নিউট্রন শোষক পদার্থ যেমন ক্যাডমিয়াম প্রবেশ করিয়ে দিয়ে নিউট্রন সংখ্যা হ্রাস করা যায়। পারমাণবিক চুল্লীর ভিতর অতিরিক্ত নিউট্রন উৎপন্ন হয়ে যাতে বিস্ফোরণ না ঘটে তার দিকে যেমন দৃষ্টি রাখতে হয়, তেমনি উপরোক্ত প্রক্রিয়াগুলির ফলে যাতে অতিরিক্ত নিউট্রন নষ্ট হয়ে গিয়ে চুল্লীর কাজ থেমে যেতে না পারে তার জন্যও ব্যবস্থা অবলম্বন করতে হয়। যখন নিউট্রন উৎপাদনের হার ও অপচয়ের হার পরস্পর সমান তখন চুল্লীর ভিতর ক্রিয়াশীল নিউট্রনের সংখ্যা মোটামুটি অপরিবর্ত্তিত থাকবে এবং বিদারণজাত শক্তি উৎপাদনের হারও নির্দিষ্ট থাকবে। চুল্লীর এই অবস্থাকে বলা হয় এর সঙ্কট অবস্থা, এই অবস্থায় উপনীত হতে হলে যে সর্ত্তগুলি পালিত হওয়া দরকার সেগুলি আমরা সংক্ষেপে আলোচনা করব।

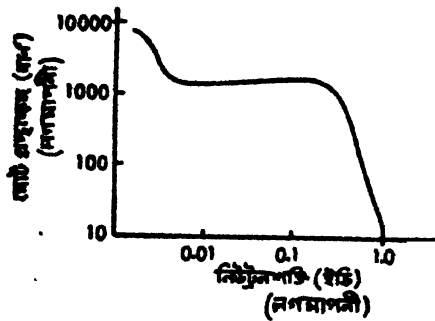
পারমাণবিক চুল্লীর (Nuclear reactor) ক্রিয়াপদ্ধতি

প্রকৃতিজাত ইউরেনিয়ামের ভিতর U^{235} আইসোটোপের পরিমাণ খুব সামান্য হওয়া সত্ত্বেও তা ব্যবহার ক'রে ব্যবহারিক ভিত্তিতে শক্তি-উৎপাদনক্ষম চুল্লী নির্ম্মিত হয়েছে। বর্ত্তমানে আমরা প্রকৃতিজাত ইউরেনিয়াম জ্বালানী এবং গ্রাফাইট হ্রাসকের সমন্বয়ে গঠিত একটি পারমাণবিক চুল্লীর ক্রিয়াপদ্ধতির সংক্ষিপ্ত বর্ণনা দেব। চুল্লীর ভিতর ইউরেনিয়াম ধাতু ও হ্রাসক পদার্থ নির্দিষ্ট পরিকল্পনা অনুযায়ী সাজান থাকে, এরকম চুল্লীর অভ্যন্তরের আকৃতি হয় অনেকটা একটা মৌচাকের মত। হ্রাসক পদার্থ, যেমন গ্রাফাইট, খোপের আকারে সাজান থাকে এবং ঐ খোপগুলির ভিতর ইউরেনিয়াম ধাতুপিণ্ড রেখে

দেওয়া হয়। হ্রাসক পদার্থ ও ইউরেনিয়াম পিণ্ড বিশেষ পদ্ধতিতে পাশাপাশি সাজাবার পিছনে গুরুত্বপূর্ণ কারণ রয়েছে। বিদারণের ফলে যে 2 এমইভি নিউট্রনগুলির সৃষ্টি হয় এদের U^{238} আইসোটোপের ভিতর বিকিরণাত্মক আহরণ বিক্রিয়ার দ্বারা শোষিত হবার সম্ভাবনা কম, কিন্তু তাপীয় শক্তিতে আনয়নের সময় 1000 ইভি শক্তির নীচে এই বিক্রিয়ার প্রস্থচ্ছেদ অত্যধিক বৃদ্ধি পায়, যদিও তাপীয় শক্তি অঞ্চলে আবার ঐই প্রস্থচ্ছেদের পরিমাণ থাকে খুবই কম। U^{238} এর ভিতর এই শোষণ কোন বিদারণের সৃষ্টি করে না এবং চুল্লীর ক্রিয়ার পক্ষে এই নিউট্রনগুলি সম্পূর্ণ অপচয়িত হিসাবে গণ্য করা যায়। এই অপচয় নিরোধের জন্য তাপীয় শক্তিতে আনয়নের সময় নিউট্রনগুলি যাতে ইউরেনিয়াম পিণ্ডের ভিতর অবস্থান না করতে পারে চুল্লীর পরিকল্পনায় সেদিকে বিশেষ লক্ষ্য রাখা হয়। মৌচাকের আকৃতির সজ্জার ফলে হ্রাসক এবং জ্বালানী সর্ব্বত্রই পাশাপাশি থাকে। বিদারণের দ্বারা সৃষ্ট নিউট্রনগুলি ইউরেনিয়ামের ভিতর থেকে নির্গত হয়ে নিকটে অবস্থিত হ্রাসকের ভিতরে চলে আসতে পারে, সেখানে এরা খুব অল্প সময়ের মধ্যেই তাপীয় শক্তিতে উপনীত হয় এবং সেই অবস্থায় আবার ইউরেনিয়াম পিণ্ডের ভিতর ফিরে এসে নূতন বিদারণ বিক্রিয়ার সূত্রপাত করে।

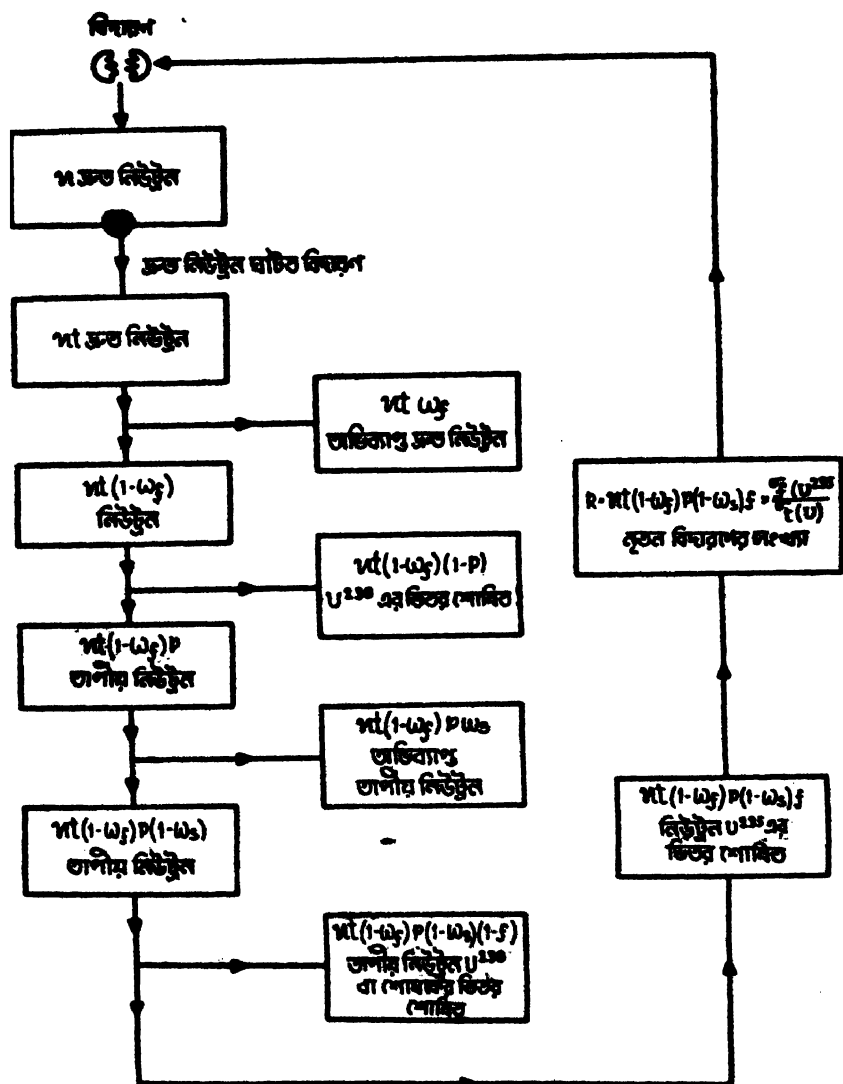
পারমাণবিক চুল্লীতে ব্যবহৃত নিউট্রন শোষক হ'ল এমন একটি পদার্থ যার স্বল্পশক্তিবিশিষ্ট নিউট্রন শোষণ করার ক্ষমতা খুবই বেশী। ক্যাডমিয়াম ধাতুর তৈরী দণ্ড নিউট্রন শোষক হিসাবে সর্ব্বত্র ব্যবহৃত হয়। 11·4 চিত্রে ক্যাডমিয়ামের নিউট্রন আহরণ বিক্রিয়ার প্রস্থচ্ছেদ দেখান হয়েছে, তাপীয় শক্তিতে প্রস্থচ্ছেদ সর্ব্বত্রই 2000 বার্নের বেশী। অত্যধিক প্রস্থচ্ছেদ থাকার জন্য ক্যাডমিয়াম অতিদ্রুত নিউট্রন শোষণ ক'রে চুল্লীর কার্য্যাবলী নিয়ন্ত্রণ করতে পারে। বোরনেরও নিউট্রন শোষণ ক্ষমতা খুব বেশী এজন্য এটিও ব্যবহৃত হয়। এইসব পদার্থ ইস্পাতের সঙ্গে সঙ্কর হিসাবে ব্যবহৃত হয়। চুল্লীর মধ্যে কতগুলি ফোকর থাকে এবং ঐগুলির ভিতর দিয়ে সুবিধামত নিয়ন্ত্রণ দণ্ডগুলি প্রবেশ করান হয় অথবা বের ক'রে নিয়ে আসা হয়।

কিন্তু শুধুমাত্র নিউট্রনশোষকের সাহায্যে একটি চুল্লীকে নিয়ন্ত্রণে রাখা সম্ভব নয়, কারণ চুল্লীর ভিতর বিদারণ প্রক্রিয়া এত দ্রুত ঘটতে থাকে যে এক সেকেণ্ডের ক্ষুদ্র ভগ্নাংশের মধ্যেই চুল্লীটি সম্পূর্ণ নিয়ন্ত্রণাতীত বিস্ফোরণের অবস্থায় পৌঁছে যেতে পারে। যাতে চুল্লীটির ভিতর এত দ্রুত অনিয়ন্ত্রিত অবস্থার সৃষ্টি না হতে পারে তার জন্য বিদারণের ফলে নির্গত বিলম্বিত

নিউট্রনের সাহায্য নেওয়া হয়। চুল্লীটি এমনভাবে চালান হয় যে শুধুমাত্র দ্রুত ক্ষরিত নিউট্রনের (prompt neutron) প্রভাবে এটি কখনই সঙ্কট অবস্থায় পৌঁছুতে পারে না, সঙ্কট অবস্থার সৃষ্টি হতে পারে শুধু উভয়প্রকার নিউট্রনের মিলিত প্রভাবের ফলেই। চুল্লীর এই প্রকারের সঙ্কট অবস্থাকে বলা হয় এর বিলম্বিত সঙ্কট অবস্থা। একটি বিলম্বিত নিউট্রনের নির্গমন হতে সময় লাগে গড়ে 12 সেকেণ্ড, অর্থাৎ এই পরিমাণ সময় অতিক্রান্ত না হলে ঐ নিউট্রনগুলি পুনরায় বিদারণের জন্য পাওয়া যাবে না। এইভাবে চুল্লীর অভ্যন্তরে বিক্রিয়ার হার শ্লথ হয়ে পড়ায় চুল্লীটি সহজেই নিয়ন্ত্রণে রাখা

চিত্র 11·4 : ক্যাডমিয়ামের নিউট্রন আহরণ প্রস্থচ্ছেদ।

যায়। বিলম্বিত নিউট্রনের অনুপাত অতি সামান্য হলেও চুল্লী নিয়ন্ত্রণের কাজে এগুলি সাফল্যজনকভাবে প্রয়োগ করা যায়।

চুল্লীর ভিতর সঙ্কট অবস্থা সৃষ্টি হতে হলে যেসকল সর্ত্ত পালিত হওয়ার প্রয়োজন সেগুলি নিম্নে প্রদত্ত সংক্ষিপ্ত বিশ্লেষণের দ্বারা মোটামুটি প্রকাশ করা যেতে পারে। 11·5 চিত্রে একটি ছকের সাহায্যে এই বিশ্লেষণের বিবরণ দেওয়া হয়েছে। প্রাকৃতিক ইউরেনিয়ামের ভিতর মিশ্রিত অবস্থায় একটি U^{235} কেন্দ্রীনের বিদারণে গড়ে n-সংখ্যক শক্তিশালী নিউট্রন উৎপন্ন হয়, আমাদের অনুসন্ধানের বিষয় হবে এদের মধ্য থেকে কয়টি নিউট্রন পুনরায় চুল্লীর অভ্যন্তরস্থ অন্যান্য U^{235} কেন্দ্রীনে বিদারণ ঘটাতে সক্ষম হবে। উৎপন্ন নিউট্রনগুলি তৎক্ষণাৎ U^{235} এর ভিতর বিদারণ ঘটাতে সক্ষম নয়, প্রথমে এদের তাপীয় শক্তিতে আনয়ন করতে হবে তবেই বিদারণের সম্ভাবনা যথেষ্ট বৃদ্ধি পাবে। তবে 2 এমইভি শক্তির নিউট্রনও ইউরেনিয়ামের আইসোটোপগুলির ভিতর সামান্য পরিমাণে বিদারণ ঘটাতে সক্ষম, ধরা যাক এইরূপ শক্তিশালী নিউট্রনের দ্বারা বিদারণ ঘটার ফলে গড়ে বিদারণপিছু উৎপন্ন নিউট্রনের সংখ্যা হয় $n\epsilon$; ϵ এর পরিমাণ একের

সামান্য বেশী, এর পরিমাণ জ্বালানীর ভিতর U^{235} এবং U^{238} এর অনুপাতের উপর নির্ভরশীল। যেকোন সীমিত আয়তন বিশিষ্ট চুল্লীর ভিতরই কিছুসংখ্যক নিউট্রনের অভিব্যাপ্তির ফলে নষ্ট হয়ে যাবার সম্ভাবনা আছে। এই অপচয় রোধের জন্য নিউট্রন প্রতিবিম্বক ব্যবহার করা হয়; এটি হ'ল চুল্লীর চারপাশে গ্রাফাইটের একটি আস্তরণ। গ্রাফাইটের ভিতর নিউট্রনের দ্রুত বহুসংখ্যক সংঘর্ষ ঘটে এজন্য এদের গতিবেগ বিপরীতমুখী হয়ে

চিত্র 11·5: তাপীয় নিউট্রন চালিত চুল্লীর ভিতর বিদারণজাত n-সংখ্যক দ্রুত নিউট্রনের জীবনচক্রের বিবরণ।

যাবার সম্ভাবনা প্রবল এবং এভাবে কিছুসংখ্যক নিউট্রন পুনরায় চুল্লীর ভিতর ফিরে আসতে পারে। ধরা যাক তাপীয় শক্তিতে আনয়নের আগেই উৎপন্ন নিউট্রনগুলির একটি অংশ ω_f অভিব্যাপ্ত হয়ে চুল্লীর বাইরে বেরিয়ে যায়, অর্থাৎ $nt\omega_f$ সংখ্যক নিউট্রন এইভাবে নষ্ট হয়ে যায়, বাকী থাকে $nt(1-\omega_f)$ সংখ্যক নিউট্রন। এই নিউট্রনগুলি যথেষ্ট শক্তিশালী, এরা হ্রাসকের কেন্দ্রীনগুলির সঙ্গে ক্রমাগত সংঘর্ষে শক্তি হারিয়ে ক্রমশঃ শ্লথ হতে আরম্ভ করে। কিন্তু শ্লথ হওয়াকালীন এদের U^{238} এর ভিতর শোষিত হবার সম্ভাবনা থাকে, শোষণ বন্ধ করার জন্য ইউরেনিয়াম জ্বালানী ও হ্রাসক পাশাপাশি রাখা হয়, কিন্তু তাহলেও তা সম্পূর্ণরূপে নিবারণ করা যায় না। ধরা যাক একটি নিউট্রনের এইভাবে অনুরণন বিক্রিয়ার দ্বারা শোষিত না হবার সম্ভাবনা p, সুতরাং যেসকল নিউট্রন শ্লথ হতে আরম্ভ করে তাদের মধ্যে $nt(1-\omega_f)p$ সংখ্যক তাপীয় শক্তিতে নীত হয়, বাকী $nt(1-\omega_f)(1-p)$ সংখ্যক নিউট্রন শোষিত হয়ে শেষ পর্য্যন্ত $_{94}Pu^{239}$ আইসোটোপের সৃষ্টি করে।

যেসব নিউট্রন তাপীয় শক্তিতে পৌঁছেছে তাদের মধ্যে আবার কিছু অংশ কোনরকম বিদারণ ক্রিয়া ঘটাবার আগেই অভিব্যাপ্ত হয়ে চুল্লীর বাইরে চলে যায় এবং এভাবে নষ্ট হয়। মনে করা যাক এই অংশের পরিমাণ হল ω_t, বাকী $nt(1-\omega_f)p(1-\omega_t)$ সংখ্যক নিউট্রনের একটি অংশ f ইউরেনিয়ামের ভিতর শোষিত হয় এবং অপর অংশ $1-f$ চুল্লীর ভিতর অন্যান্য পদার্থ, যেমন হ্রাসক অথবা চুল্লী গঠনকারী পদার্থ, ইত্যাদির ভিতর শোষিত হয়। সুতরাং অবশিষ্ট $nt(1-\omega_f)p(1-\omega_t)f$ সংখ্যক নিউট্রন পাওয়া যায় যেগুলি তাপীয় অবস্থায় এসে ইউরেনিয়ামের ভিতর শোষিত হয়। কিন্তু যে তাপীয় নিউট্রনগুলি শোষিত হয় তাদের প্রত্যেকটিই যে বিদারণের সৃষ্টি করে তা নয়, U^{235} এবং U^{238} উভয়ের ভিতরই বিদারণবিহীন তাপীয় নিউট্রন আহরণ ঘটতে পারে, উভয় বিক্রিয়ার নির্দিষ্ট যদিও সামান্য পরিমাণের প্রস্থচ্ছেদ রয়েছে (সারণী 11·1 দ্রষ্টব্য)। সুতরাং যেসব তাপীয় নিউট্রন ইউরেনিয়ামের ভিতর শোষিত হয় তাদের মধ্যে যেগুলি শুধুমাত্র বিদারণবিক্রিয়া ঘটিয়ে থাকে তাদের অনুপাত হ'ল $\sigma_f(U)/\sigma_t(U)$। এক্ষেত্রে

$\sigma_f(U)$ = প্রাকৃতিক ইউরেনিয়ামের বিদারণ প্রস্থচ্ছেদ

$\sigma_t(U)$ = প্রাকৃতিক ইউরেনিয়ামের তাপীয় নিউট্রন আহরণ ও বিদারণের মোট প্রস্থচ্ছেদ

সুতরাং শেষ পর্যন্ত যতগুলি নিউট্রন যথার্থই পুনর্ব্বার বিদারণ সৃষ্টি করে তাদের সংখ্যা হ'ল

$$k = nt(1-\omega_f)p(1-\omega_g)f\,\frac{\sigma_f(U)}{\sigma_t(U)} \quad \cdots \quad 11\cdot1$$

k রাশিটিকে বলা হয় পুনঃপ্রজনন গুণক, অর্থাৎ একটি বিদারণ ঘটার ফলে তাথেকে অপর একটি বিদারণ ঘটাবার মত যতগুলি নিউট্রন চুল্লীর ভিতর উৎপন্ন হয়, k হ'ল সেই সংখ্যা। একটি চুল্লীর ভিতর শিকল বিক্রিয়া ক্রমাগত চলতে থাকার সর্ত্ত হল $k \geq 1$; যদি $k < 1$ হয় তবে স্থায়ী শিকল বিক্রিয়া চলা সম্ভব নয় কারণ তখন একটি চক্র থেকে অপর একটি চক্রে বিদারণের সংখ্যা ক্রমাগত কমে যেতে থাকবে এবং চুল্লীটির ক্রিয়া দ্রুত বন্ধ হয়ে যাবে। যখন $k > 1$ তখন প্রতি চক্রেই বিদারণের সংখ্যা ক্রমান্বয়ে বৃদ্ধি পেতে থাকায় অবশেষে অতি শীঘ্রই একটি বিস্ফোরণাত্মক অবস্থার সৃষ্টি হবে। $k=1$ অবস্থাই হ'ল চুল্লীর সঙ্কট অবস্থা, তখন নির্দ্দিষ্ট হারে বিদারণ ঘটতে থাকবে। 11·1 সম্বন্ধটি থেকে আমরা বিলম্বিত সঙ্কট অবস্থার সর্ত্তটিও আবিষ্কার করতে পারি, ধরা যাক প্রতি বিদারণে উৎপন্ন বিলম্বিত নিউট্রনের সংখ্যা গড়ে δ ; এখন যদি k' রাশিটিকে নিম্নলিখিতভাবে সংজ্ঞায়িত করা যায়

$$k' = (n-\delta)t(1-\omega_f)p(1-\omega_t)f\,\frac{\sigma_f(U)}{\sigma_t(U)} \quad \cdots \quad 11\cdot2$$

তাহলে বিলম্বিত সঙ্কট অবস্থার সর্ত্ত হ'ল

$$k=1$$
$$k'<1$$

যদি $k'<1$ হয় তবে শুধুমাত্র দ্রুতক্ষরিত নিউট্রনের দ্বারা চুল্লীটি কখনই সঙ্কট অবস্থায় উপনীত হতে পারে না।

প্রস্থচ্ছেদের যে পরিমাণগুলি 11·1 সারণীতে দেওয়া হয়েছে তাদের সাহায্যে $\sigma_f(U)/\sigma_t(U)$ রাশিটি গণনা করা যায়।

$$\frac{\sigma_f(U)}{\sigma_t(U)} = \frac{4\cdot12}{4\cdot12+3\cdot51} = 0\cdot54$$

এবং $\eta = n\cdot\dfrac{\sigma_f(U)}{\sigma_t(U)} = 2\cdot5 \times 0\cdot54 = 1\cdot35$। এই নূতন রাশি η-র সাহায্যে 11·1 সূত্রটিকে নিম্নলিখিত সংক্ষিপ্ত উপায়ে লেখা যায়

$$k = \eta t(1-\omega_f)p(1-\omega_s)f \quad \cdots \quad 11\cdot3$$

η-র পরিমাণ হ'ল ইউরেনিয়ামের ভিতর প্রতি তাপীয় নিউট্রন শোষিত হবার ফলে গড়ে যে কয়টি নিউট্রন উৎপন্ন হয় তার সংখ্যা। η স্বভাবতঃই জ্বালানীর ভিতর বিভিন্ন আইসোটোপের অনুপাতের উপর নির্ভর করে। কৃত্রিম উপায়ে যদি জ্বালানীর ভিতর U^{235} আইসোটোপের অনুপাত বৃদ্ধি করা হয় তবে η বৃদ্ধি পাবে। η-র পরিমাণ সম্বন্ধে জ্ঞান বিভিন্ন ধরণের চুল্লী নির্ম্মাণের পক্ষে বিশেষ প্রয়োজনীয়।

যদি আমরা একটি সীমাহীন চুল্লী কল্পনা করি যেখানে অভিব্যাপ্তির ফলে নিউট্রন বিনষ্ট হবার সম্ভাবনা নেই তাহলে ω_f, $\omega_s = 0$ এবং

$$k_\infty = \eta t p f$$

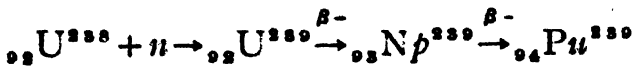
একটি চুল্লী নির্ম্মাণের জন্য এর অভ্যন্তরে বিশেষ হ্রাসক ও জ্বালানী সজ্জার আয়োজনের জন্য যে k_∞ মান উৎপন্ন হয় তার জ্ঞান অত্যন্ত প্রয়োজনীয়। কতগুলি বিশেষ বিশেষ হ্রাসক ও জ্বালানীর সজ্জা আছে যাদের ভিতর k_∞ কখনই একের অধিক হয় না। যেমন সাধারণ জল হ্রাসক ও প্রাকৃতিক ইউরেনিয়াম জ্বালানী ব্যবহার করলে কোন ভাবেই $k_\infty \geq 1$ করা সম্ভব নয়, সুতরাং এই দুই পদার্থের সমন্বয়ে স্থায়ী শিকলবিক্রিয়া ঘটান সম্ভব নয়। এর কারণ অবশ্য হাইড্রোজেনের ($_1H^1$) ভিতর নিউট্রন শোষণের অত্যধিক প্রস্থচ্ছেদ। আবার D_2O এবং প্রাকৃতিক ইউরেনিয়াম ব্যবহার ক'রে অপেক্ষাকৃত সহজেই $k_\infty > 1$ সজ্জা সৃষ্টি করা সম্ভব।

k_∞ এর পরিমাণ নির্ভর করে সজ্জার ভিতর p এবং f এর পরিমাণ কি হয় তার উপর। f এর পরিমাণ বিশেষভাবে নির্ভর করে নিউট্রনশোষক পদার্থের উপস্থিতির উপর, একটি শোষক পদার্থের দণ্ড প্রবেশ করিয়ে দিয়ে অথবা বের ক'রে নিয়ে এসে f এর পরিমাণ যথেষ্ট পরিমাণে বাড়ান কমান যায় এবং এভাবে একটি চুল্লী নিয়ন্ত্রণে রাখা সম্ভব। তাছাড়া p এবং f উভয়ই হ্রাসক এবং জ্বালানীর পারস্পরিক সজ্জার উপর বিশেষভাবে নির্ভরশীল। উদাহরণ হিসাবে, যদি গ্রাফাইট ও প্রাকৃতিক ইউরেনিয়াম সর্ব্বত্র সমভাবে মিশ্রিত ক'রে একটি সজ্জা তৈরী করা হয় তবে গণনা ক'রে দেখান যায় যে সেক্ষেত্রে k_∞ একের অধিক হতে পারে না, কিন্তু পূর্ব্ব বিবরণ অনুযায়ী যদি গ্রাফাইটকে ক্রমান্বয়ে খোপের আকারে সাজিয়ে তার ভিতর নির্দ্দিষ্ট আকারের প্রাকৃতিক ইউরেনিয়ামের তাল রেখে একটি সজ্জা তৈরী করা হয় তবে সেক্ষেত্রে $k_\infty > 1$ সম্ভব হতে পারে।

যেসমস্ত সজ্জার ক্ষেত্রে $k_\infty > 1$, তাদের দ্বারা একটি সীমিত আয়তন সমন্বিত স্থায়ী শিকলবিক্রিয়াশীল চুল্লী গঠিত হতে পারে। সেক্ষেত্রে সঙ্কট অবস্থা সৃষ্টি হতে হলে $k = k_\infty(1-l)$ রাশিটির অবশ্যই একের অধিক হওয়া প্রয়োজন, এখানে l হ'ল ঐ নির্দিষ্ট সীমিত আয়তনের ভিতর থেকে একটি নিউট্রনের অভিব্যাপ্ত হয়ে নষ্ট হয়ে যাবার সম্ভাব্যতা। সীমিত আয়তনের পরিমাণ যত কমতে থাকে স্বাভাবিকভাবে l এর পরিমাণ ততই বৃদ্ধি পাবে। এভাবে একটি বিশেষ পরিমাণের আয়তন নির্দেশ করা যায় যার কম হলে, l এর পরিমাণ অতিরিক্ত বৃদ্ধি পায় যার দ্বারা k এর পরিমাণ একের কম হয়ে পড়ে, আবার অধিক হলে l এর পরিমাণ হ্রাস পায় এবং k একের অধিক হয়ে পড়ে। ঐ বিশেষ আয়তনকে সঙ্কট আয়তন আখ্যা দেওয়া হয়, এই আয়তনেই স্থায়ী শিকলবিক্রিয়া চলতে থাকবে। বিভিন্ন ধরণের হ্রাসক ও জ্বালানীর সমবায়ের জন্য এদের সঙ্কট আয়তন তাত্ত্বিক গণনার দ্বারা নির্ণয় করা সম্ভব। সঙ্কট আয়তনের পরিমাণ হ্রাসক ও জ্বালানী সজ্জার আকৃতির উপরও নির্ভর করে, অর্থাৎ চৌপলাকার বা বর্তুলাকার আকৃতির জন্য সঙ্কট আয়তনের পরিমাণের ব্যতিক্রম হয়। সীমিত সঙ্কট আয়তন সৃষ্টি করা সম্ভব বলেই পারমাণবিক চুল্লী নির্মাণ সম্ভব হয়।

প্রজনক চুল্লী (Breeder reactor)

চুল্লীর গঠন বিশ্লেষণের সময় আমরা বলেছি যে U^{238} নিউট্রন শোষণ ক'রে চুল্লীর কাজের ব্যাঘাত সৃষ্টি করে এজন্য চুল্লীর গঠনে বিশেষ সতর্কতা অবলম্বন করতে হয়। এই শোষণের দ্বারা শেষ পর্য্যন্ত প্লুটোনিয়াম উৎপন্ন হয়

$$_{92}U^{238} + n \rightarrow {}_{92}U^{239} \xrightarrow{\beta-} {}_{93}Np^{239} \xrightarrow{\beta-} {}_{94}Pu^{239}$$

প্লুটোনিয়ামের ধর্ম্মাবলীর মধ্যে অন্যতম হ'ল যে, এর এই আইসোটোপটির কেন্দ্রীন ঠিক U^{235} এর মতই তাপীয় নিউট্রনের দ্বারা বিদারণক্ষম। প্লুটোনিয়াম প্রকৃতিজাত মৌল নয়, শুধু পারমাণবিক চুল্লীর ভিতরই একে কৃত্রিম উপায়ে প্রস্তুত করা যায়। রাসায়নিক পদ্ধতিতে একে অনায়াসেই পৃথক করা চলে এবং অর্দ্ধজীবনকাল যথেষ্ট বেশী বলে পারমাণবিক শক্তি উৎপাদনের জন্য একে ব্যবহার করা সম্ভব। প্লুটোনিয়ামের এক একটি বিদারণপিছু গড়ে 2·9 সংখ্যক নিউট্রন উৎপন্ন হয়। পারমাণবিক চুল্লীর ভিতর সামান্য পরিমাণে প্লুটোনিয়াম সব সময়ই উৎপন্ন হয় কিন্তু জ্বালানী হিসাবে ব্যবহৃত হবার সম্ভাবনা থাকায় একে ব্যাপকভাবে উৎপন্ন করার প্রচেষ্টা

হয়েছে। বর্ত্তমানে এমন চুল্লী নির্ম্মাণ সম্ভব যা $U^{238} - Pu^{239}$ মিশ্রণের দ্বারা ক্রিয়া করে কিন্তু চলবার সময় যতটা জ্বালানী Pu^{239} খরচ করে তার চেয়ে বেশী পরিমাণে উৎপন্ন করে, অর্থাৎ এই মিশ্রণের দ্বারা একটি চুল্লী নির্ম্মাণ ক'রে তাতে মাঝে মাঝে কিছু U^{238} যোগ ক'রে গেলে চুল্লীর ক্রিয়া ক্রমাগত চলতে থাকবে। এইভাবে জগতের বিপুল পরিমাণ সঞ্চিত U^{238} যা নিউট্রনের দ্বারা সহজে বিদারণক্ষম নয় এবং এই কারণে চুল্লীর জ্বালানী হিসাবে ব্যবহার করা যায় না, তাও জ্বালানী হিসাবে ব্যবহার করা সম্ভব হবে। এই ধরণের চুল্লীকে বলা হয় প্রজনক চুল্লী এবং বর্ত্তমানে সাফল্যজনকভাবে যুগপৎ পারমাণবিক শক্তি উৎপাদন ও প্রজননের জন্য এদের নির্ম্মাণ সম্ভব।

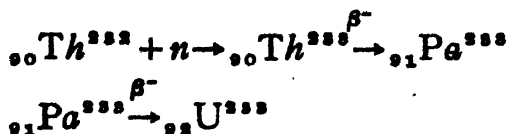
প্রজনক চুল্লী নির্মাণ সমস্যার ক্ষেত্রে প্রধান জ্ঞাতব্য বিষয় হ'ল সেক্ষেত্রে $Pu^{239} - U^{238}$ মিশ্রণের জন্য η-র পরিমাণ। η-র সংজ্ঞা আমরা পূর্ব্বেই দিয়েছি এবং প্লুটোনিয়ামের জন্য

$$\eta = 2\cdot9 \times \frac{\sigma_{\text{বিদারণ}}(Pu)}{\sigma_{\text{মোট}}(Pu)}$$

কিন্তু তাপীয় নিউট্রনের দ্বারা প্লুটোনিয়ামের বিদারণ প্রস্থচ্ছেদ এবং বিদারণ ও আহরণের মোট প্রস্থচ্ছেদ পরিমাপ ক'রে দেখা গেছে যে η এক্ষেত্রে 2এর সামান্য কম হয়। এথেকে বোঝা যায় যে তাপীয় নিউট্রনের দ্বারা প্রজনন ক্রিয়া এক্ষেত্রে সাফল্যজনকভাবে চালান সম্ভব নয়, কারণ যে হারে বিদারণ ঘটবে তার চেয়ে কম হারে জ্বালানী প্রস্তুত হবে। সাফল্যজনক বিদারণ এবং প্রজনন ক্রিয়া চালাতে হলে η-র পরিমাণ 2এর যথেষ্ট অধিক হওয়া বাঞ্ছনীয়, কারণ উৎপন্ন নিউট্রনগুলির ভিতর একটি অবশ্যই ব্যবহৃত হবে অপর একটি বিদারণের জন্য যাতে চুল্লীর ভিতর বিদারণ চক্রটি বজায় থাকে, বাকীগুলির মধ্যে যদি একের অধিকসংখ্যক নিউট্রন Pu^{239} আইসোটোপ উৎপন্ন করার জন্য ব্যয়িত হয় তবে চুল্লীটি যে পরিমাণে জ্বালানী খরচ করে তার চেয়ে অধিক পরিমাণে উৎপন্ন করতে পারবে এবং তখনই সাফল্যজনক প্রজননক্রিয়া সম্ভব হবে। অপেক্ষাকৃত অধিকতর নিউট্রনশক্তিতে বিদারণ প্রস্থচ্ছেদ ও মোট প্রস্থচ্ছেদের অনুপাত ক্রমশঃ একের নিকটবর্ত্তী হয়, তখন η বৃদ্ধি পেয়ে 2এর যথেষ্ট অধিক হতে পারে এবং তখন সাফল্যজনক প্রজননক্রিয়া সম্ভব হবে। প্রজনক চুল্লী এজন্য শক্তিশালী নিউট্রনের বিক্রিয়ার দ্বারা চালাতে হয় এবং এতে বিশেষ কোন হ্রাসক পদার্থ ব্যবহৃত হয় না।

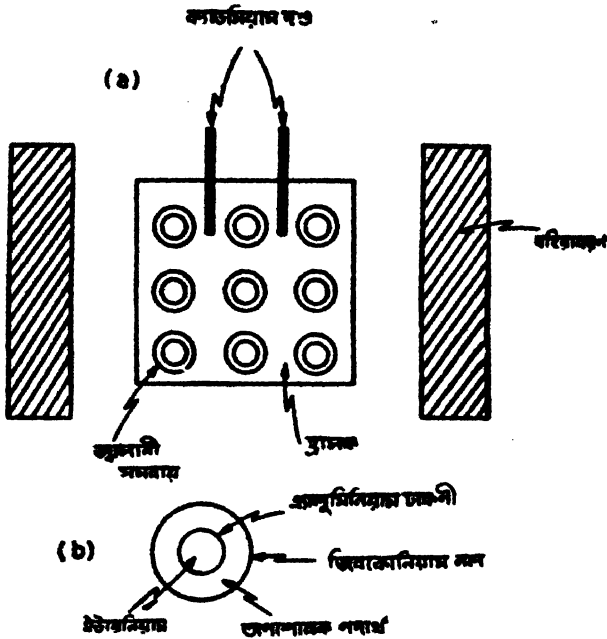
U^{233} এর মত থোরিয়াম অপর একটি পদার্থ যার তাপীয় নিউট্রনের দ্বারা বিদারণ ঘটে না, কিন্তু একেও নিউট্রন আহরণের দ্বারা বিদারণক্ষম পদার্থে পরিণত করা যায়।

$$_{90}Th^{232}+n\rightarrow {}_{90}Th^{233}\xrightarrow{\beta^-}{}_{91}Pa^{233}$$

$$_{91}Pa^{233}\xrightarrow{\beta^-}{}_{92}U^{233}$$

U^{233} আইসোটোপটির অর্দ্ধজীবনকাল $1{\cdot}62\times10^5$ বছর, এর শ্লথ নিউট্রনঘটিত বিদারণ প্রস্থচ্ছেদ খুবই বেশী। Th^{232} এর বিভিন্ন প্রস্থচ্ছেদগুলি পরিমাপ ক'রে দেখান সম্ভব হয়েছে যে এইক্ষেত্রে তাপীয় ও শক্তিশালী উভয়বিধ নিউট্রনের দ্বারাই সাফল্যজনক প্রজননক্রিয়া চালান সম্ভব হবে (এক্ষেত্রে তাপীয় নিউট্রনের জন্য $\eta=2{\cdot}31$)। জগতে সঞ্চিত থোরিয়ামের পরিমাণ ইউরেনিয়ামের তিনগুণেরও বেশী,[5] সুতরাং থোরিয়ামকে জ্বালানীতে রূপান্তরিত করতে পারলে লভ্য পারমাণবিক জ্বালানীর পরিমাণ আরও বহুগুণ বৃদ্ধি পাবে।

পারমাণবিক চুল্লী নির্ম্মাণের সমস্যা

অন্যান্য ধরণের শক্তি উৎপাদন পদ্ধতির তুলনায় পারমাণবিক চুল্লীর ভিতর অত্যুচ্চ তাপমাত্রা সৃষ্টির সম্ভাবনা সীমিত, কারণ চুল্লীর ভিতর শুধু এমনসব পদার্থ ব্যবহার করা হয় যাদের নিউট্রন শোষণের ক্ষমতা খুব কম। তাছাড়া চুল্লীর ভিতর ইউরেনিয়াম জ্বালানী যাতে গলে না যেতে পারে তার দিকে দৃষ্টি রাখতে হয়। চুল্লীর অভ্যন্তরকে ঠাণ্ডা রাখার জন্য কোন এক ধরণের তরল বা গ্যাসীয় তাপ-অপসারক পদার্থ ব্যবহার করার প্রয়োজন হয়। অধিকাংশ ক্ষেত্রেই এই কাজের জন্য ব্যবহৃত হয় সাধারণ জল, তবে বিশেষ বিশেষ ক্ষেত্রে অন্যান্য তাপ-অপসারক যেমন তরল সোডিয়াম ধাতু, হিলিয়াম অথবা কার্ব্বন ডাই-অক্সাইড গ্যাস অথবা অন্য কোন উচ্চ-গলনাঙ্ক-বিশিষ্ট তরল পদার্থ, এগুলিও তাপ-অপসারক হিসাবে ব্যবহৃত হয়ে থাকে ; চুল্লীর অভ্যন্তরে বসান নলের ভিতর দিয়ে এগুলি সঞ্চালিত হতে থাকে। জলের গলনাঙ্ক অপেক্ষাকৃত কম এজন্য অতি উচ্চচাপে জল ব্যবহার করা প্রয়োজন যাতে এর গলনাঙ্ক যথেষ্ট বৃদ্ধি পেতে পারে এবং তাপ-অপসারক হিসাবে এর উপযোগিতা বৃদ্ধি পায়, এই কারণে তীব্র তাপ ও চাপসহ পদার্থের দ্বারা তাপ-অপসারক পদার্থের নল প্রস্তুত করার প্রয়োজন। এ সমস্যাকে অতিক্রম করার জন্য কখনও কখনও, বিশেষ ক'রে প্রজনক চুল্লীর ক্ষেত্রে

তাপ-অপসারক হিসাবে তরল সোডিয়াম ধাতু ব্যবহৃত হয়, কিন্তু বাতাসের সংস্পর্শে এটি জ্বলে ওঠে এজন্য বিশেষ সতর্কতা অবলম্বন করার প্রয়োজন। তাছাড়া চুল্লীর নিউট্রন প্রবাহের মধ্যে সোডিয়াম কিয়ৎপরিমাণে তেজস্ক্রিয় হয়ে পড়ে। মোটের উপর এমন একটি পদার্থ তাপ-অপসারক হিসাবে ব্যবহার করার প্রয়োজন যার দ্বারা চুল্লীর নিরাপত্তা, নিউট্রন সঞ্চয় এবং আর্থিক সুরাহা—এসবের মধ্যে সামঞ্জস্য স্থাপিত হয়।

চিত্র 11·6 : (a) একটি চুল্লীর ভিতর জ্বালানী, হ্রাসক, শোষক ইত্যাদি যেভাবে সজ্জিত থাকে তার একটি প্রস্থচ্ছেদ চিত্র ;
(b) একটি জ্বালানী ও তাপশোষক সমবায়ের অভ্যন্তরীণ সজ্জার প্রস্থচ্ছেদ চিত্র।

উচ্চ তাপমাত্রা এবং ইউরেনিয়ামের ন্যায় তীব্র রাসায়নিক ক্রিয়াশীল পদার্থের অস্তিত্ব থাকার দরুণ চুল্লী গঠনকারী পদার্থগুলিকে রাসায়নিক ক্ষয়ের সম্মুখীন হতে হয়, তেজস্ক্রিয় বিকিরণ এই ক্ষয়কে আরও ত্বরান্বিত করে। এইসব কারণে ইউরেনিয়াম জ্বালানী রড্‌গুলিকে কোন রাসায়নিক নিষ্ক্রিয় পদার্থের দ্বারা উত্তমরূপে আবরিত ক'রে রাখার প্রয়োজন যাতে এরা অন্যান্য পদার্থের সংস্পর্শে না আসতে পারে। এরকম একটি পদার্থ হ'ল জিরকোনিয়াম, এর গলনবিন্দু খুবই উচ্চ, প্রায় 1900°C, তাপ এবং বিকিরণ সহ্য করার ক্ষমতাও অত্যধিক এবং নিউট্রন শোষণের পরিমাণ খুব কম (নিউট্রন

আহরণ প্রস্থচ্ছেদ 0·18 বার্ন)। এর রাসায়নিক সহনশীলতা খুবই বেশী। প্রায় 370°C তাপমাত্রাতেও জলের সংস্পর্শে এই ধাতুটি রাসায়নিক নিষ্ক্রিয় থাকতে পারে। এই ধাতুটি ব্যবহারিক ভিত্তিতে উৎপন্ন হচ্ছে। তাপ-অপসারক পদার্থবাহী নল তৈরী করতে বর্ত্তমানে এটি ব্যবহৃত হয়।

একটি তাপীয় নিউট্রন চালিত চুল্লীর গঠন মোটামুটি নিম্নরূপ (চিত্র 11·6) : একটি টিউবের ভিতর বন্ধ ইউরেনিয়াম জ্বালানীর তৈরী রড্ হ্রাসকের মধ্যে প্রবেশ করিয়ে দেওয়া হয়, হ্রাসক হয় সাধারণতঃ একটি চৌবাচ্চার মধ্যে রাখা ভারী জল অথবা খোপের আকারে সাজান গ্রাফাইট, এছাড়া এই সজ্জার ভিতর একাধিক শোষক পদার্থের দণ্ড প্রবেশ করান এবং বের ক'রে নিয়ে আসার ব্যবস্থা থাকে। সমগ্র আয়োজনটিকে মুড়ে রাখে পুরু গ্রাফাইটের আস্তরণ যা নিউট্রন প্রতিবিম্বক হিসাবে কাজ করে। প্রতিবিম্বক সহ সমস্ত আয়োজনটি একটি বায়ুরোধক ইস্পাতের কক্ষের ভিতর রাখা হয়, এই ইস্পাতকক্ষটি ঘিরে থাকে আবার খুব পুরু (5 ফুট বা ততোধিক) কংক্রিটের আবরণ যা চুল্লীটির ভিতর থেকে আগত নিউট্রন ও গামারশ্মি সম্পূর্ণরূপে শোষণ করতে সক্ষম। কংক্রিটের দেওয়ালটির গামারশ্মি শোষণ ক্ষমতা বৃদ্ধি করার জন্য কংক্রিটের ভিতর উচ্চ পারমাণবিক সংখ্যা বিশিষ্ট পদার্থ যেমন লৌহচূর্ণ বা লোহার অক্সাইডও প্রবেশ করিয়ে দেওয়া হয়। নিরাপত্তার জন্য একটি চুল্লী এমনভাবে নির্ম্মাণ করা হয় যাতে তাপমাত্রা বৃদ্ধির সাথে সাথে এর পুনঃপ্রজনন গুণক k সবসময়ই হ্রাস পায়। অর্থাৎ এর ফলে সহসা চুল্লীটির ভিতর অতিরিক্ত উত্তাপ সৃষ্টি হলে চুল্লীর ক্রিয়া আপনা থেকেই বন্ধ হয়ে যাবে। তাছাড়া চুল্লী নিয়ন্ত্রণকারী সমবায়গুলিতে ব্যবহৃত বৈদ্যুতিক বর্ত্তনীগুলিও এমনভাবে নির্ম্মিত হয় যাতে এদের কোন একটি অকেজো হয়ে গেলে সঙ্গে সঙ্গে চুল্লীটির ক্রিয়াও স্বয়ংক্রিয়ভাবে বন্ধ হয়ে যাবে।

বিস্ফোরণ-কার্য্যে পারমাণবিক শক্তির ব্যবহার সর্ব্বজনবিদিত। পারমাণবিক বোমা নির্ম্মাণে শোধিত যথাসম্ভব বিশুদ্ধ U^{235} অথবা প্লুটোনিয়াম ব্যবহার করা হয়। বোমাটিকে একটি চুল্লী হিসাবে কল্পনা করা যায় যার $k > 1$; অবশ্য একটি পারমাণবিক চুল্লীর ভিতর $k > 1$ হলেই যে এর পারমাণবিক বোমার ন্যায় বিস্ফোরণ হবে তা ঠিক নয়। একটি বিস্ফোরণ ঘটতে হলে প্রায় 10^{-5} সেকেণ্ডের মধ্যেই সমস্ত শক্তি নির্গত হয়ে যাওয়ার প্রয়োজন। এত দ্রুত শক্তি নিঃসারিত হতে হলে বিদারণ চক্রটি খুব দ্রুত চলা দরকার, অর্থাৎ সেক্ষেত্রে বিদারণ ঘটতে হবে

দ্রুত নিউট্রনদের দ্বারা। কিন্তু চুল্লীর ভিতর হ্রাসকের উপস্থিতির ফলে নিউট্রনের গতি সবসময়ই শ্লথ হয়ে পড়ে এবং বিদারণ ঘটে সাধারণতঃ এই শ্লথ নিউট্রনদের দ্বারা যেগুলি ভ্রমণের জন্য অনেক বেশী সময় নেয়, যার ফলে প্রতি বিদারণচক্রাপিছু সময়ের পরিমাণও অনেক বৃদ্ধি পায়। একটি চুল্লীর ভিতর $k>1$ হলে অতিরিক্ত উত্তাপের ফলে এর অভ্যন্তরস্থ পদার্থ গলে যেতে পারে কিংবা বাষ্পীভূত হয়ে যেতে পারে, এবং অবশেষে তা সম্ভবতঃ বয়লারের বিস্ফোরণের মত কোন অপেক্ষাকৃত ছোট বিস্ফোরণের সৃষ্টি করবে।

পারমাণবিক বোমার ক্ষেত্রে কোন হ্রাসক বা শোষক পদার্থ নেই এবং বিশুদ্ধ আইসোটোপ ব্যবহার করা হয় বলে বিস্ফোরণশীল আয়তন এবং ভর অনেক কম হয় এবং একে অনায়াসেই বিমানে কিংবা রকেটে বহন করা চলে। স্বতঃবিদারণের ফলে U^{235} পিণ্ডের ভিতর সাধারণতঃ কিছুসংখ্যক মুক্ত নিউট্রন সৃষ্টি হয়, পিণ্ডের আয়তন উপযুক্ত পরিমাণে অধিক না হলে নিউট্রনগুলি এর ভিতর স্থিতিশীল শিকল বিক্রিয়া শুরু করতে পারে না, কারণ এদের অধিকাংশই অভিব্যাপ্ত হয়ে পিণ্ডের বাইরে বেরিয়ে যায়। কিন্তু পিণ্ডের আয়তন বৃদ্ধি ক'রে অবশেষে একটি সঙ্কট আয়তনে এসে পৌঁছুনো যায় যখন এর ক্ষেত্রে $k>1$ এবং তখন একটি প্রগতিশীল শিকলবিক্রিয়া শুরু হতে পারে। এই অবস্থায় অতি সামান্য সময়ের মধ্যেই পিণ্ডটির ভিতর বিস্ফোরণের সৃষ্টি হবে। বর্তুলাকার সমন্বিত ন্যূনতম পরিমাণের বিশুদ্ধ বিস্ফোরক আইসোটোপের ভর যার ভিতর শিকলবিক্রিয়া প্রগতিশীল হয় অর্থাৎ একবার শুরু হলে ক্রমাগত এগিয়ে চলে, তাকে বলা হয় সঙ্কটভর, এই ভরের পরিমাণ গাণিতিক উপায়ে গণনা করা যায়। কোন-রকম হ্রাসকের উপস্থিতি না থাকার দরুণ এই বিস্ফোরণ হয় শুধু শক্তিশালী নিউট্রনের বিদারণের দ্বারা। বোমার নির্ম্মাণ পদ্ধতি বা সঙ্কটভরের পরিমাণ খুব ভালভাবে জানা যায় না, তবে এরকম অনুমান করা যায় যে দুই বা অধিক ইউরেনিয়াম পিণ্ড যাদের ভর সঙ্কটভরের তুলনায় কম, এদের পরস্পরের নিকট থেকে দূরে রাখা হয়; বিস্ফোরণের মুহূর্তে তীব্র গতিতে এই পিণ্ডগুলিকে একীকৃত ক'রে দেওয়া হয়, এই অবস্থায় এদের মিলিত ভর সঙ্কট-ভরের সমান হয় এবং তখন আপনা-আপনি বিস্ফোরণ ঘটে, বিদারণ শুরু করার জন্য যাতে পর্য্যাপ্ত পরিমাণ নিউট্রন পাওয়া যায় তার জন্য সম্ভবতঃ কোন নিউট্রন উৎসও বোমার ভিতর রাখতে হয়। প্রাকৃতিক ইউরেনিয়ামের সঙ্কট আয়তনের পরিমাণ অসীম এজন্য বিশুদ্ধ প্রাকৃতিক ইউরেনিয়ামে আপনা-আপনি

সঙ্কট অবস্থা সৃষ্টি হতে পারে না। প্রাকৃতিক ইউরেনিয়ামের দ্বারা গঠিত চুল্লীর ভিতর নিউট্রন হ্রাসক এবং প্রতিবিম্বক পদার্থের উপস্থিতির ফলেই সঙ্কট আয়তনের পরিমাণ কমে আসে এবং চুল্লীর ক্রিয়া সম্ভব হয়।

অপর একটি পদ্ধতি যা বর্ত্তমানে প্রায় সর্ব্বজনীনভাবে ব্যবহৃত হয়, তা হ'ল অন্তর্ধাবন পদ্ধতি। এই পদ্ধতিতে বিদারণক্ষম আইসোটোপের একটি বর্ত্তুল প্রস্তুত করা হয় যার ভিতর আইসোটোপের ঘনত্ব উপযুক্ত পরিমাণে থাকে না, এজন্য সঙ্কট অবস্থা সৃষ্টি হতে পারে না। তবে বর্ত্তুলটি এমনভাবে প্রস্তুত করা হয়ে থাকে যাতে অন্তর্ধাবন প্রক্রিয়ার দ্বারা সঙ্কুচিত করলে এটি সঙ্কট ঘনত্ব ও আয়তন প্রাপ্ত হয়। এই বর্ত্তুলের চারপাশ ঘিরে থাকে অত্যধিক বিস্ফোরণক্ষম কোন রাসায়নিক পদার্থ যেমন টিএনটি-র আবরণ। যদি এই বর্ত্তুলাকার বিস্ফোরকের সেলটির বিভিন্ন অংশে একই মুহূর্ত্তে বিস্ফোরণ ঘটান যায় তাহলে তার ফলে উৎপন্ন শক তরঙ্গ (Shock wave) অন্তঃস্থ বর্ত্তুলটিকে সঙ্কুচিত করে এবং এভাবে এটি অতর্কিতে সঙ্কট অবস্থায় উপনীত হয়। যথার্থ অন্তর্ধাবন সৃষ্টি করতে হলে বর্ত্তুলাকার বিস্ফোরকের আবরণটির ভিতর প্রতিসমভাবে বহুসংখ্যক অঞ্চলে একযোগে বিস্ফোরণ ঘটাতে হবে যাতে ঠিক বর্ত্তুলাকারে সঙ্কোচন ঘটে। উপযুক্ত অন্তর্ধাবন ঘটাতে পারাই পারমাণবিক বোমা নির্ম্মাণের মূল কৌশল, এর পর বিস্ফোরণ আপনা-আপনিই ঘটে। ভারতবর্ষের পোখরানে যে বিদারণ বোমার বিস্ফোরণ ঘটান হয়েছে তাতে অন্তর্ধাবন পদ্ধতি ব্যবহৃত হয়েছে, যে বিদারণক্ষম পদার্থ এক্ষেত্রে ব্যবহৃত হয়েছে তা হ'ল প্লুটোনিয়াম।

সংযোজন বিক্রিয়া (Fusion reaction)

বিদারণ বিক্রিয়ার সাহায্যে যেমন কেন্দ্রীন ভেঙ্গে তার ভিতর থেকে শক্তি নির্গমন করান সম্ভব, তেমনি আরও কতগুলি কেন্দ্রীনের বিক্রিয়া আছে যাদের সাহায্যেও প্রচুর পরিমাণে শক্তি নিঃসারিত হয়, এই বিক্রিয়াগুলি সংযোজন বিক্রিয়া নামে পরিচিত। এদের কতগুলি উদাহরণ নিম্নে দেওয়া হ'ল :

বিক্রিয়া	Q পরিমাণ (এমইভি)	
$H^2 + H^3 \rightarrow He^4 + n$	17·6	
$H^2 + H^2 \rightarrow H^1 + H^3$	4	
$H^1 + H^3 \rightarrow He^4 + \gamma$	19·8	
$H^2 + He^3 \rightarrow He^4 + H^1$	18·3	11·5
$Li^6 + H^2 \rightarrow He^4 + He^4$	22·4	
$Li^7 + H^1 \rightarrow He^4 + He^4$	17·3	
$H^2 + H^2 \rightarrow He^3 + n$	3·2	

আমরা যদি 11·2 লেখটিতে কেন্দ্রীনগুলির অবস্থান ও বন্ধনশক্তির পরিমাণ লক্ষ্য করি তাহলে সহজেই বুঝতে পারব কেন সংযোজন বিক্রিয়ায় এত শক্তি নির্গত হয়। লেখটিতে স্পষ্ট দেখা যায় যে প্রথমদিকে অর্থাৎ খুব কম ভরসংখ্যা বিশিষ্ট কেন্দ্রীনগুলিতে ভরসংখ্যার সাথে সাথে বন্ধনশক্তির পরিমাণ অতিদ্রুত বৃদ্ধি পায়। সুতরাং এই অঞ্চলে অবস্থিত দুটি অল্প ভরসংখ্যার কেন্দ্রীন যদি সংযোজন বিক্রিয়ায় মিলিত হয়ে একটি অপেক্ষাকৃত বৃহৎ ভরসংখ্যা সমন্বিত কেন্দ্রীনের জন্ম দেয় তাহলে বিপুল পরিমাণে শক্তি নিঃসারিত হবে। 11·2 চিত্রের লেখটিতে এই অঞ্চলটি মোটামুটি 1 থেকে 20 ভরসংখ্যা পর্যন্ত বিস্তৃত, উপরিলিখিত বিক্রিয়াগুলিতে আবির্ভূত কেন্দ্রীনগুলির ভরসংখ্যা সমস্তই এই অঞ্চলে অবস্থিত। এই লেখটি থেকে আরও প্রতীয়মান হয় যে, যদি কেন্দ্রকণাপ্রতি নিঃসারিত শক্তির পরিমাণ বিচার করা যায় তাহলে সংযোজন বিক্রিয়ায় যে শক্তি নিঃসারিত হয় তা বিদারণের ফলে নিঃসারিত শক্তির তুলনায় অনেক বেশী।

সংযোজন বিক্রিয়ার সহায়তায় ব্যবহারিক ভিত্তিতে শক্তি উৎপাদনের প্রচেষ্টা বহুদিন থেকে চলছে, যদিও এই প্রচেষ্টায় এখনও সাফল্যলাভ করা সম্ভব হয়নি। উপরিলিখিত প্রতিটি বিক্রিয়াই আহিত কেন্দ্রীনগুলির মধ্যে ঘটছে সুতরাং প্রতিক্ষেত্রেই কুলম্ব প্রতিরোধ অতিক্রম করার জন্য আঘাতকারী কণাগুলির ভিতর কিছু গতিশক্তি সঞ্চারিত থাকা আবশ্যক। এই বিক্রিয়াগুলির সবই পরীক্ষাগারে ত্বরণযন্ত্রের দ্বারা আলফাকণা, প্রোটন অথবা ডিউটেরনকে যথাযোগ্য শক্তিতে ত্বরিত ক'রে ঘটান সম্ভব, কিন্তু ব্যবহারিক ভিত্তিতে শক্তি উৎপাদনের জন্য এই প্রক্রিয়া অচল। একমাত্র পদ্ধতি হ'ল সংযোজন বিক্রিয়াশীল পরমাণুতে গঠিত গ্যাসকে প্রচণ্ড তাপমাত্রায় উত্তপ্ত করা, তখন উত্তপ্ত গ্যাসের ভিতর কেন্দ্রীনগুলির মধ্যে বিপুল গতিশক্তি সঞ্চারিত হবে এবং সেই শক্তির প্রভাবে এরা নিজেদের মধ্যে সংঘর্ষ ঘটিয়ে তাপ-পারমাণবিক বিক্রিয়ার জন্ম দেবে। পূর্ব্বের উদাহরণে ডিউটেরন-ডিউটেরন অথবা ডিউটেরন-ট্রাইটন বিক্রিয়ার ক্ষেত্রে সংযোজন বিক্রিয়াশীল গ্যাসের তাপমাত্রা এত অধিক হওয়া দরকার যাতে কেন্দ্রীনগুলির তাপীয় গতিশক্তি গড়ে 10 কেইভি হয়। এই পরিমাণ শক্তি যদি এদের গ্যাস বলবিজ্ঞান প্রদত্ত গড়-শক্তি অর্থাৎ $\frac{3}{2}k\mathrm{T}$-এর সমান হয় তবে তাথেকে প্রয়োজনীয় তাপমাত্রার যে পরিমাণ গণনা করা যায় তা প্রায় 10^{8}°K। যদি ডিউটেরিয়াম গ্যাসকে এই তাপমাত্রায় উত্তপ্ত করা যায় তবে এর ভিতর কিছুসংখ্যক কেন্দ্রীনের মধ্যে স্বয়ংক্রিয়ভাবে সংযোজন বিক্রিয়া ঘটতে আরম্ভ

করবে এবং এই বিক্রিয়ার দ্বারা যে তাপ উৎপন্ন হবে তা তখন তাপমাত্রাকে ঐ উচ্চ মানে রক্ষা করতে সমর্থ হবে, এই হ'ল নিয়ন্ত্রিত সংযোজন বিক্রিয়ার মূলনীতি। এই প্রক্রিয়াকে নিয়ন্ত্রিত তাপকেন্দ্রীন বিক্রিয়াও আখ্যা দেওয়া হয়ে থাকে। 11.5 বিক্রিয়াগুলির মধ্যে সবচেয়ে সম্ভাবনাপূর্ণ হ'ল প্রথম বিক্রিয়াটি, এর প্রস্থচ্ছেদ অন্যান্য বিক্রিয়াগুলির তুলনায় অনেক বেশী এবং নির্গত শক্তির পরিমাণও যথেষ্ট বেশী। তবে অসুবিধা হ'ল এই যে প্রকৃতির ভিতর লভ্য ট্রাইটিয়ামের পরিমাণ অত্যন্ত কম; কিন্তু নিয়ন্ত্রিত তাপকেন্দ্রীন বিক্রিয়া সফল হলে তাথেকে নির্গত নিউট্রনের সাহায্যে প্রচুর পরিমাণে নূতন ট্রাইটিয়াম প্রজনন সম্ভব হতে পারে।

কিন্তু সমস্যা হ'ল এই যে, এত উচ্চ তাপমাত্রা সৃষ্টি করা ও রক্ষা করা কিভাবে সম্ভব। এই তাপমাত্রার অনেক নিম্নেই জগতের যাবতীয় পদার্থ বাষ্পীভূত হয়ে যায়। এত অধিক তাপমাত্রায় এই হাল্কা পরমাণুগুলির গড় গতিশক্তি এদের যেকোন আয়নীভবন বিভবের তুলনায় অনেক বেশী, সুতরাং ক্রমাগত সংঘর্ষের ফলে প্রতিটি পরমাণুই সম্পূর্ণরূপে আয়নিত হয়ে যাবে, এই অবস্থায় তখন কেন্দ্রীন ও ইলেকট্রনগুলি মুক্ত অবস্থায় পাশাপাশি অবস্থান করবে। গ্যাসের এই সম্পূর্ণ আয়নিত অবস্থাকে বলা হয় প্লাজমা। এইসকল অত্যুচ্চ তাপমাত্রাকে রক্ষা করার মত আধারের সন্ধান পাওয়া খুবই দুরূহ, তবে যেহেতু প্লাজমা হ'ল আহিত উচ্চশক্তিসম্পন্ন কণার একটি গ্যাস একে রক্ষা করার জন্য নানারকম অভিনব চৌম্বক "বোতলের" পরিকল্পনা করা হয়েছে। উচ্চ তীব্রতাসম্পন্ন চৌম্বকক্ষেত্রের নানারকম আয়োজনের দ্বারা প্লাজমার কণাগুলিকে একটি সুনির্দিষ্ট আয়তনের ভিতর সঙ্কুচিত রাখা যায় কিনা তা নিয়ে এখন নানারকম পরীক্ষা-নিরীক্ষা চলছে। একটি পদ্ধতিতে কোন একটি অঞ্চলে চৌম্বকক্ষেত্র এমনভাবে সৃষ্টি করা হয় যাতে কেন্দ্র অঞ্চলে চৌম্বকক্ষেত্রের তীব্রতা সামান্যই থাকে, কিন্তু কেন্দ্র থেকে যতই দূরে যাওয়া যায় ততই তীব্রতা বৃদ্ধি পেতে থাকে এবং প্রান্তের নিকটে ক্রমশঃ ক্ষেত্রটি প্রচণ্ড তীব্রতা প্রাপ্ত হয়। এইরকম চৌম্বকক্ষেত্রের ভিতর প্লাজমা কেন্দ্রীয় অঞ্চলে সঙ্কুচিত হয়ে থাকে কারণ কণাগুলি প্রান্তের দিকে অগ্রসর হলে তীব্র ক্ষেত্রের প্রভাবে বেঁকে গিয়ে আবার কেন্দ্রের দিকে ফিরে আসে। অত্যধিক তাপমাত্রা সৃষ্টি করা এবং সেই তাপমাত্রাকে ধারণ করা উভয়ই একই সাধারণ সমস্যার অন্তর্গত, বর্তমানে পরীক্ষাগারে অতি অল্প সময়ের জন্য (10^{-3} সেকেণ্ড) কয়েক কেইভি গড় শক্তি উৎপাদনক্ষম তাপমাত্রা সৃষ্টি করা সম্ভব হয়েছে। উচ্চ তাপমাত্রা সৃষ্টি করার নানারকম

উপরয় আছে। একটি পদ্ধতিতে কোন বৃহদাকার তড়িৎধারকের মধ্য থেকে পরীক্ষাধীন গ্যাসের মধ্য দিয়ে বিদ্যুৎমোক্ষণ করান হয়, বিদ্যুৎপ্রবাহের পরিমাণ দশ লক্ষ এ্যাম্পিয়ার পর্যন্ত হতে পারে, অবশ্য এই প্রবাহ স্থায়ী হয় অতি সামান্য সময়ের জন্যই। বিদ্যুৎপ্রবাহের ফলে যে প্রচণ্ড তাপের সৃষ্টি হয় তার প্রভাবে পরীক্ষাধীন পদার্থ প্লাজমায় পরিণত হয়। আবার ঐ বিদ্যুৎপ্রবাহই অতি অল্পসময়ের জন্য যে প্রচণ্ড চৌম্বকক্ষেত্রের সৃষ্টি করে তা প্লাজমাকে সঙ্কুচিত ক'রে রাখতে সাহায্য করে। আরেকটি প্রক্রিয়া হ'ল অপেক্ষাকৃত ঠাণ্ডা প্লাজমার ভিতর চৌম্বকক্ষেত্রের তীব্রতা ক্রমান্বয়ে দ্রুত বর্দ্ধিত ক'রে যাওয়া। তীব্রতর চৌম্বকক্ষেত্রের প্রভাবে প্লাজমা সঙ্কুচিত হতে থাকে এবং সঙ্কোচনের দ্বারা তাপমাত্রাও দ্রুত বৃদ্ধি পায়, ঠিক যেমন কোন গ্যাসকে তাপবিনিময়বিহীন অবস্থায় অতর্কিতে সঙ্কুচিত করলে এর তাপমাত্রা দ্রুত বৃদ্ধি পায়।

প্রসঙ্গতঃ উল্লেখযোগ্য যে "হাইড্রোজেন বোমার" ভিতর অনিয়ন্ত্রিত তাপকেন্দ্রীন বিক্রিয়া ঘটে। হাইড্রোজেন বোমার গঠন মোটামুটি নিম্নরূপঃ এর কেন্দ্রে থাকে একটি পারমাণবিক বোমা অর্থাৎ যার বিস্ফোরণ শুধু বিদারণ বিক্রিয়ার উপর নির্ভর করে, পারমাণবিক বোমাটিকে আবরিত ক'রে রাখে সংযোজন বিক্রিয়াশীল পদার্থের একটি আস্তরণ। ঠিক কোন্ বিক্রিয়াগুলি হাইড্রোজেন বোমার জন্য ব্যবহৃত হয় তা নিশ্চিতরূপে জানা যায় না, তবে ডিউটেরিয়াম ও ট্রাইটিয়ামের মিশ্রণ অথবা লিথিয়াম ও হাইড্রোজেনের মিশ্রণ বোমাটির ইন্ধন হিসাবে ব্যবহার করা যায় (11·5 বিক্রিয়াগুলি দ্রষ্টব্য)। প্রথমে পারমাণবিক বোমাটি ফাটান হয় এবং এর ফলে যে প্রচণ্ড তাপমাত্রা উৎপন্ন হয় তাতে ঐ মিশ্রণের ভিতর সংযোজন বিক্রিয়া শুরু হয় এবং তার ফলে এই বিস্ফোরণে আরও অনেক বেশী শক্তি নিঃসারিত হয়; হাইড্রোজেন বোমার নিঃসারিত শক্তি এই কারণে পারমাণবিক বোমার তুলনায় অনেক বেশী হয়।

আরও অধিক শক্তির বিস্ফোরণের জন্য কোন কোন ক্ষেত্রে হাইড্রোজেন বোমার চারপাশে U^{238}এর একটি আস্তরণ দেওয়া হয়, বোমার বিস্ফোরণে তীব্র শক্তিশালী বিপুলসংখ্যক নিউট্রন উৎপন্ন হয়, এই নিউট্রনগুলি U^{238}এর ভিতর ব্যাপকভাবে বিদারণ ঘটাতে পারে এবং তার ফলে আরও অধিকতর শক্তি নির্গত হয়। তথাকথিত 'মেগাটন' (10^6 টন টিএনটি-র সমান বিস্ফোরণশক্তি বিশিষ্ট) বোমা সম্ভবতঃ এইভাবেই নির্মিত হয়।

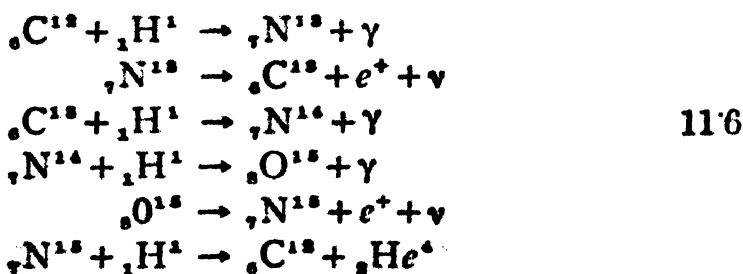
সূর্য্যের ভিতর তাপসঞ্চার

সূর্য্যের ভিতর কিভাবে তাপের সঞ্চার হয় এবং কিভাবে সূর্য্য একই হারে এত দীর্ঘকালে ধ'রে শক্তি বিকিরণ ক'রে চলেছে, এসব প্রশ্ন বহুদিন যাবৎ বিজ্ঞানীদের নিকট দুর্বোধ্য ছিল। কেন্দ্রীনঘটিত বিক্রিয়াগুলি আবিষ্কৃত হবার আগের যুগে বিজ্ঞানীরা নানাভাবে সূর্য্যের ভিতর তাপসঞ্চারের ব্যাখ্যা দেবার চেষ্টা করেছেন কিন্তু কোন ব্যাখ্যাই শেষপর্য্যন্ত যুক্তিযুক্ত হিসাবে গণ্য হতে পারেনি। সবচেয়ে অধিক যে মতবাদটি প্রচলিত ছিল সেটি হচ্ছে এই যে, সূর্য্য ক্রমশঃ সঙ্কুচিত হয়ে চলেছে এবং সঙ্কোচনের ফলে এর মাধ্যাকর্ষণজনিত বিভবশক্তি ক্রমাগত বৃদ্ধি পেয়ে চলেছে এবং এইহেতু বিপুল পরিমাণ শক্তি সূর্য্যের ভিতর থেকে নিঃসারিত হচ্ছে। কিন্তু এই ব্যাখ্যা অনুযায়ী সূর্য্যের জীবনকাল, এর আয়তন এবং ওজনের ভিতর সামঞ্জস্য রক্ষিত হয় না। যদি সঙ্কোচনই সূর্য্যের তাপসঞ্চারের একমাত্র প্রক্রিয়া হয় তাহলে সূর্য্য কত দীর্ঘকাল যাবৎ বর্ত্তমান হারে তাপ বিকিরণ ক'রে চলতে পারে তা গণনা ক'রে বলা যায়। এই সময়কাল হ'ল প্রায় 2 কোটি বছর। কিন্তু ভূবিজ্ঞানীরা নানা পরীক্ষা থেকে নিশ্চিত সিদ্ধান্ত করেছেন যে যেসময় যাবৎ বর্ত্তমান হারে সূর্য্যের বিকিরণ পৃথিবীর উপর এসে পড়ছে তা 100 কোটি বছরেরও বেশী। এথেকেই সিদ্ধান্ত করতে হয় যে সূর্য্যে তাপসঞ্চারের উপরোক্ত প্রকল্পটি সঠিক হতে পারে না।

আইনস্টাইন যখন আপেক্ষিকতাতত্ত্ব প্রয়োগ ক'রে ভর ও শক্তির সম্বন্ধসূচক সূত্রটি আবিষ্কার করেন তখন থেকেই বিজ্ঞানীরা ভাবতে শুরু করলেন যে সূর্য্যের ভিতর থেকে এই যে বিপুল শক্তি বিকিরিত হচ্ছে তা সম্ভবতঃ আইনস্টাইনের সূত্র অনুযায়ী কোনপ্রকারে পদার্থের শক্তিতে রূপান্তরণের জন্যই সম্ভব হচ্ছে। কিন্তু কিভাবে বিপুল পরিমাণ পদার্থ শক্তিতে রূপান্তরিত হতে পারে তা শুধু কেন্দ্রীনঘটিত বিক্রিয়াগুলি আবিষ্কারের পর থেকেই কল্পনা করা সম্ভব হ'ল। অনেকেই অনুমান করেছিলেন যে সূর্য্যের ভিতর ব্যাপক হারে সংযোজন বিক্রিয়া ঘটছে। সূর্য্যের ভিতর প্রচুর পরিমাণ হাইড্রোজেন সঞ্চিত আছে, সূর্য্যের ভরের প্রায় শতকরা 90 ভাগই হাইড্রোজেন ও হিলিয়ামের সমন্বয়ে গঠিত ব'লে অনুমান করা হয়েছে, হাইড্রোজেন এবং হিলিয়াম পরস্পরের তুল্য অনুপাতে রয়েছে। সূর্য্যের ভিতর ইউরেনিয়াম ইত্যাদি ভারী মৌলের পরিমাণ খুবই সামান্য এবং পরমাণু বিদারণের দ্বারা সূর্য্যের এত দীর্ঘকাল যাবৎ তাপ বিকিরণ ব্যাখ্যা করা সম্ভব নয়। সূর্য্যের ভিতর হিলিয়াম ও

হাইড্রোজেনের প্রাচুর্য্য থেকে মনে হয় যে কোন উপায়ে হাইড্রোজেনের হিলিয়ামে রূপান্তরণের দ্বারাই সূর্য্যের তাপসম্ভার সম্ভব হচ্ছে, বস্তুতঃ এই প্রকল্পের দ্বারা সৌরমণ্ডলের সৃষ্টির পর থেকে সূর্য্যের ভিতর থেকে এপর্য্যন্ত যত তাপ নিঃসারিত হয়েছে এবং বর্তমানে যে হারে তাপ বিকিরণ চলছে সমস্ত কিছুরই সঠিক হিসাব দেওয়া যায়। এখন সমস্যা হচ্ছে কিভাবে এই রূপান্তরণ ঘটে।

চারটি প্রোটন সহসা সংঘর্ষে একত্র হয়ে একটি হিলিয়াম কেন্দ্রীন সৃষ্টি করবে এরকম সম্ভাবনা খুবই কম এবং সূর্য্যের ভিতর তা ঘটে না ব'লেই ধ'রে নেওয়া যায়। বহুসংখ্যক কেন্দ্রীন ঘটিত বিক্রিয়া পর্য্যালোচনা ক'রে অবশেষে বিজ্ঞানী বেঠে (Bethe) প্রথম হাইড্রোজেনের হিলিয়ামে রূপান্তরণের একটি যুক্তিসঙ্গত প্রক্রিয়ার প্রস্তাব করেন। এই প্রস্তাব অনুযায়ী হাইড্রোজেনের হিলিয়ামে রূপান্তরণ কতগুলি বিভিন্ন বিক্রিয়ার সাহায্যে ধাপে ধাপে, অর্থাৎ প্রথমটির পর দ্বিতীয়টি, তারপর তৃতীয়টি এইভাবে ঘটে। বেঠে প্রোটনের হিলিয়ামে রূপান্তরণের জন্য যে বিক্রিয়াসমষ্টি নির্দেশ করেন তাদের মধ্যে একটি কার্বন চক্র (Carbon cycle) নামে প্রসিদ্ধ, এই বিক্রিয়াচক্রটি হ'ল নিম্নরূপ :

$$\begin{aligned} {}_6C^{12} + {}_1H^1 &\rightarrow {}_7N^{13} + \gamma \\ {}_7N^{13} &\rightarrow {}_6C^{13} + e^+ + \nu \\ {}_6C^{13} + {}_1H^1 &\rightarrow {}_7N^{14} + \gamma \\ {}_7N^{14} + {}_1H^1 &\rightarrow {}_8O^{15} + \gamma \\ {}_8O^{15} &\rightarrow {}_7N^{15} + e^+ + \nu \\ {}_7N^{15} + {}_1H^1 &\rightarrow {}_6C^{12} + {}_2He^4 \end{aligned} \qquad 11\cdot6$$

উভয়দিকে যোগ করলে এবং যে কেন্দ্রীনগুলি দু'পাশেই উপস্থিত থাকে সেগুলি বাদ দিলে আমরা শেষপর্য্যন্ত নিম্নলিখিত বিক্রিয়াটিতে উপনীত হই :

$$4\,{}_1H^1 \rightarrow {}_2He^4 + Q$$

এক্ষেত্রে Q উপরোক্ত বিক্রিয়াগুলি থেকে উদ্ভূত সমস্ত Q পরিমাণগুলির যোগফল, জোড়া বিনাশের দ্বারা পজিট্রনগুলিও শেষপর্য্যন্ত বিদ্যুৎচুম্বকীয় বিকিরণে পরিণত হয়। এই Q-পরিমাণ অবশ্য হাইড্রোজেন ও হিলিয়ামের ভর থেকেই গণনা করা যায়, $Q = 26\cdot7$ এমইভি। এই শক্তি আলোককণা এবং নিউট্রিনো হিসাবে সূর্য্যের ভিতর থেকে বিকিরিত হয়। প্রোটনের বিক্রিয়াগুলিতে কুলম্ব প্রতিরোধের অস্তিত্ব থাকে, কিন্তু সূর্য্যের কেন্দ্রীয় অঞ্চলে তাপমাত্রা প্রায়

2 কোটি ডিগ্রী, এই অত্যধিক তাপমাত্রা বিদ্যমান থাকার ফলে প্রোটন এবং কেন্দ্রীনগুলি যথেষ্ট শক্তি অর্জন করে এবং তার ফলে উপরোক্ত প্রতিটি বিক্রিয়াই ঘটা সম্ভব। লক্ষণীয় যে, এই বিক্রিয়াচক্রের শুরুতে যে C^{12} কেন্দ্রীন নিয়ে শুরু করা হয়েছে, পরে সেইটিই আবার ফিরে পাওয়া যায়, অর্থাৎ এই চক্রের দ্বারা সূর্য্যের ভিতর সঞ্চিত কার্বনের পরিমাণের কোন হ্রাসবৃদ্ধি ঘটে না।

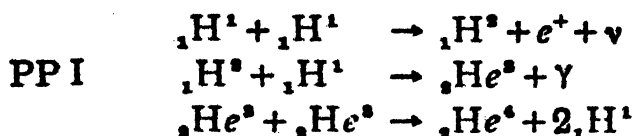
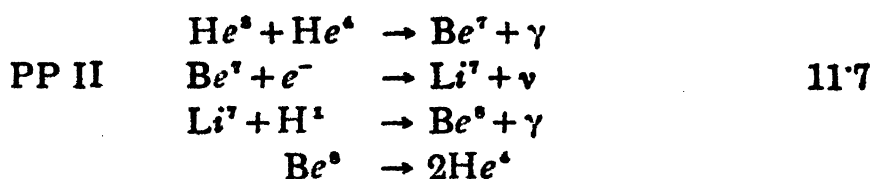
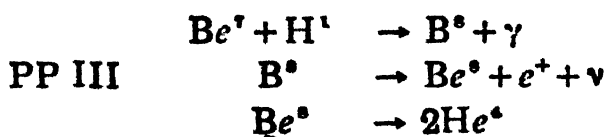
বেঠে যে অপর একটি বিক্রিয়া সমষ্টি সূর্য্যের ভিতর তাপসঞ্চারের সম্ভাব্য উৎস হিসাবে বিচার করেছেন সেটিকে বলা হয় প্রোটন চক্র, এই চক্রের বিক্রিয়াগুলি নিম্নরূপ

PP I
$$ {}_1H^1 + {}_1H^1 \rightarrow {}_1H^2 + e^+ + \nu $$
$$ {}_1H^2 + {}_1H^1 \rightarrow {}_2He^3 + \gamma $$
$$ {}_2He^3 + {}_2He^3 \rightarrow {}_2He^4 + 2\,{}_1H^1 $$

অথবা

PP II
$$ He^3 + He^4 \rightarrow Be^7 + \gamma $$
$$ Be^7 + e^- \rightarrow Li^7 + \nu \qquad 11.7 $$
$$ Li^7 + H^1 \rightarrow Be^8 + \gamma $$
$$ Be^8 \rightarrow 2He^4 $$

অথবা

PP III
$$ Be^7 + H^1 \rightarrow B^8 + \gamma $$
$$ B^8 \rightarrow Be^8 + e^+ + \nu $$
$$ Be^8 \rightarrow 2He^4 $$

এই বিক্রিয়াগুলি তিনটি পৃথক পৃথক ধারায় অগ্রসর হতে পারে এবং এদের যথাক্রমে PP I, PP II এবং PP III আখ্যা দেওয়া হয়। প্রতিটি ধারার ভিতরই শেষপর্য্যন্ত চারটি প্রোটন একটি হিলিয়ামে রূপান্তরিত হয় এবং তার ফলে কার্বন চক্রের সমপরিমাণ শক্তি নিঃসারিত হয়। সর্ব্বপ্রথমের বিক্রিয়াটির প্রস্থচ্ছেদ খুবই কম এবং পরীক্ষাগারে তা এখনও পর্য্যন্ত মাপা সম্ভব হয়নি, তবে তাত্ত্বিক উপায়ে এই প্রস্থচ্ছেদ গণনা করা যায় এবং এর পরিমাণ 10^{-33} বার্ন। বহুদিন পর্য্যন্ত বিজ্ঞানীরা ধারণা করেছেন যে সূর্য্যের ভিতর তাপ উৎপাদন মূলতঃ কার্বন চক্রের মাধ্যমেই ঘটে, কিন্তু নানারকম নূতন নূতন পরীক্ষার ভিত্তিতে বিজ্ঞানীরা এখন মনে করেন যে সূর্য্যের ভিতর প্রোটন চক্রই মুখ্য ভূমিকা অবলম্বন করে। অবশ্য এমন অনেক নক্ষত্র আছে যাদের

কেন্দ্রীয় তাপমাত্রা সূর্য্যের তুলনায় যথেষ্ট বেশী, সেগুলিতে কার্বন চক্রের দ্বারাই তাপ সঞ্চারিত হয় ব'লে ধারণা করা হয়, কিন্তু সূর্য্য বা সূর্য্যের তুলনায় ঠাণ্ডা কেন্দ্রীয় অঞ্চল সমন্বিত নক্ষত্রের ভিতর প্রোটন চক্রের প্রভাবই সর্ব্বাগ্রগণ্য ; সাম্প্রতিক কতগুলি পরীক্ষার দ্বারা এই মতবাদ দৃঢ়ভাবে সমর্থিত হয়।

সূর্য্য কিভাবে এক নির্দ্দিষ্ট হারে তাপবিকিরণ করে তারও একটা সহজ ব্যাখ্যা দেওয়া যায়। যদি সূর্য্যের অভ্যন্তরের তাপমাত্রা কোন কারণে বৃদ্ধি পেতে থাকে তবে প্রোটনগুলির গতিশক্তিও সেই হারে বাড়তে থাকবে এবং এদের দ্বারা তাপ-পারমাণবিক বিক্রিয়া ঘটার সম্ভাবনা বৃদ্ধি পাবে। কিন্তু তাপমাত্রা ক্রমশঃ বৃদ্ধি পেতে থাকলে সূর্য্যের অভ্যন্তরস্থ পদার্থ অধিকতর তাপমাত্রার প্রভাবে ক্রমশঃ সম্প্রসারিত হবে অর্থাৎ এদের ঘনত্ব কমে আসবে। এই কারণে প্রোটনের সঙ্গে বিক্রিয়াক্ষম কেন্দ্রীনগুলির সংখ্যা কমে যাবে যার ফলে মোট বিক্রিয়ার সংখ্যাও কমে আসবে। এই দুই বিপরীতমুখী প্রক্রিয়ার অবস্থিতির ফলে সূর্য্যের বিকিরণের হার সবসময় নির্দ্দিষ্ট থাকে। সূর্য্যের ভিতর যে পরিমাণ হাইড্রোজেন সঞ্চিত আছে তাথেকে অনুমান করা হয়েছে যে সূর্য্য আরও 3×10^{10} বৎসর যাবৎ একই হারে তাপ বিকিরণ ক'রে যেতে সক্ষম হবে।

প্রশ্নমালা

(1) খনিজের ভিতর ইউরেনিয়ামের দুই প্রধান আইসোটোপের যে আপেক্ষিক প্রাচুর্য্য বর্ত্তমানে লক্ষ্য করা যায় তাথেকে এবং ধরে নিয়ে যে এই প্রাচুর্য্যের অনুপাত কখনই একের অধিক ছিল না, পৃথিবীর সম্ভাব্য বয়স নির্ণয় কর। [6×10^{9} বছর]

(2) বিদারণ প্রক্রিয়ায় গড়ে প্রতি বিদারণপিছু 200 এমইভি শক্তি নির্গত হয়। যদি একটি চুল্লী 6 মেগাওয়াট হারে শক্তি উৎপাদন করতে থাকে তবে ঐ শক্তি উৎপাদন করতে প্রতি সেকেণ্ডে কতগুলি বিদারণের প্রয়োজন হবে ? [$1{\cdot}88\times10^{17}$ বিদারণ/সেকেণ্ড]

(3) ধরা যাক $_{92}U^{235}$ এর বিদারণের ফলে দুইটি সমান সমান ভর-সংখ্যা ও পারমাণবিক সংখ্যা বিশিষ্ট কেন্দ্রীন উৎপন্ন হয়েছে। উৎপাদনের মুহূর্ত্তে এদের ভিতর বৈদ্যুতিক বিকর্ষণজাত বিভবশক্তির পরিমাণ কত ? পার্শ্বলিখিত সূত্রটি প্রয়োগ কর : $R=R_0A^{\frac{1}{3}}$ [$R_0=1{\cdot}3\times10^{-15}$ মি.]।

[240 এমইভি]

(4) একটি নিউট্রন এবং $k = 1.03$ নিয়ে শুরু করলে 100 জীবনচক্র পর মোট নিউট্রনের সংখ্যা কত হবে ? [19]

(5) একটি শিকল বিক্রিয়াশীল আয়োজনের k এর পরিমাণ 1.05। এখানে নিউট্রনদের সংখ্যা দ্বিগুণ হতে হলে কতগুলি জীবনচক্রের প্রয়োজন হবে ? যদি প্রথমে 1000 নিউট্রন থাকে তবে 100 জন্ম পর নিউট্রনদের সংখ্যা কত হবে ?

n জন্ম পর নিউট্রনদের সংখ্যা হবে k^n গুণ, সুতরাং সংখ্যা দ্বিগুণ করতে হলে যতগুলি জন্মের প্রয়োজন তা $k^n = 2$ এই সমীকরণের দ্বারা প্রদত্ত, এক্ষেত্রে $k = 1.05$, সুতরাং

$$n = \frac{ln\ 2}{ln\ 1.05} = 14.2$$

অর্থাৎ প্রায় 14 জন্মের প্রয়োজন। 100 জন্ম পর কতগুলি নিউট্রন থাকবে তা জানতে হলে আমরা নিম্নলিখিত সমীকরণটি সমাধান করি

$$(1.05)^{100} = N$$

$$N = 131.5$$

যেহেতু প্রাথমিক সংখ্যা 1000, এটিকে 131.5 দিয়ে গুণ ক'রে নির্ণেয় সংখ্যা হবে 1,31,500।

(6) ধরা যাক চুল্লীর ভিতর দ্রুতক্ষরিত এবং বিলম্বিত উভয়প্রকার নিউট্রনের মিলিত জীবনকাল গড়ে 0.1 সেকেণ্ড, তবে নিউট্রনদের সংখ্যা দ্বিগুণ হতে কত সময় নেবে যদি ক্রিয়াশীল $k = 1.002$ হয় ?

(7) শুধু যদি দ্রুতক্ষরিত নিউট্রনদের বার বার জন্ম বিচার ক'রে আমরা একটি চুল্লীর আয়োজন কল্পনা করি যেখানে ক্রিয়াশীল $k = 1.03$, তবে সেক্ষেত্রে 70 জীবনচক্র পর নিউট্রনের সংখ্যা কত হয় নির্ণয় কর যদি প্রাথমিক সংখ্যা থাকে 100। [790]

(8) একটি পারমাণবিক চুল্লীর ভিতর বিদারণের হার এবং এর দ্বারা শক্তি উৎপাদনের হারের মধ্যে পারিমাণিক সম্বন্ধ নির্ণয় কর। একটি 20 মেগাওয়াট চুল্লীর মধ্যে প্রতিদিন কত পরিমাণ U^{235} এর বিদারণ ঘটবে ? (প্রতি বিদারণপিছু নির্গত শক্তির পরিমাণ 200 এমইভি) [21 গ্রাম]

(9). ধরা যাক একটি পারমাণবিক শক্তি উৎপাদনকেন্দ্র 200 মেগাওয়াট শক্তিস্তরে 4 মাস যাবৎ না থেমে কাজ ক'রে চলেছে এবং ধরা যাক প্রতি বিদারণে 0·9 সংখ্যক প্লুটোনিয়াম অণু উৎপন্ন হচ্ছে এবং শেষপর্যায় এই প্লুটোনিয়ামের 99% উদ্ধার করা সম্ভব হচ্ছে। তাহলে ঐ চার মাসে কত পরিমাণ প্লুটোনিয়াম পৃথক করা সম্ভব হবে ?

U^{235} এর পরমাণুর সংখ্যা যাতে বিদারণ ঘটছে তা হ'ল

$2\times10^{8}\times3{\cdot}12\times10^{10}\times120\times60\times24$

$=6{\cdot}47\times10^{25}$ সংখ্যক পরমাণু বা 25·25 কিলোগ্রাম U^{235}

এই রাশিটিকে ·9 এবং 0·99 দিয়ে গুণ করলে আমরা দেখি যে মোট উৎপন্ন প্লুটোনিয়ামের পরিমাণ হবে 22·9 কিলোগ্রাম।

(10) U^{235} এর বিদারণে দুটি ভগ্ন অংশ উৎপন্ন হচ্ছে যাদের প্রোটনসংখ্যা যথাক্রমে 38 এবং 54 এবং ভরসংখ্যা 95 ও 139। এই দুই কেন্দ্রীনের ভিতর মোট কত গতিশক্তি সঞ্চারিত হতে পারে ? [216 এমইভি]

এই দুই কেন্দ্রীনের ব্যাসার্ধ নির্ণয় করতে আমরা যদি $r=1{\cdot}4\times10^{-13}A^{1/3}$ এই সূত্রটি প্রয়োগ করি তাহলে এদের মধ্যে নিম্নলিখিত স্থির-বৈদ্যুতিক বিকর্ষণশক্তি নির্দেশ করা যায়

$$E=\frac{38\times54\times(4{\cdot}8\times10^{-10})^{2}}{1{\cdot}4\times10^{-13}(95^{1/3}+139^{1/3})}$$

$$=\frac{4{\cdot}72\times10^{-3}}{1{\cdot}4\times(4{\cdot}56+5{\cdot}18)}\text{ আর্গ}$$

$$=216\text{ এমইভি}$$

সুতরাং এই পরিমাণ শক্তিই ঐ দুই কেন্দ্রীনের গতিশক্তি হিসাবে প্রকাশ পাবে।

(11) এক কিলোগ্রাম প্রাকৃতিক ইউরেনিয়ামকে মন্দ তাপীয় নিউট্রনের কেন্দ্রপ্রবাহ্য 10^{12} নিউট্রন/বর্গসেমি/সেকেণ্ড এর মধ্যে রাখা হয়েছে। এক মাসে কত পরিমাণ ইউরেনিয়ামের বিদারণ ঘটবে ?

($\sigma_f=3{\cdot}9$ বার্ন, $\rho=18$ গ্রাম/সি.সি.) [0·1 গ্রাম]

(12) এক কিলোগ্রাম বিশুদ্ধ U^{235}-কে ঠিক উপরের সমস্যার মত ক্ষেত্রপ্রাবল্যের অভ্যন্তরে রাখা হয়েছে। এক মাসে কত পরিমাণ U^{235}এর বিদারণ ঘটবে ? [14·1 গ্রাম]

(13) চুল্লীর ভিতর 1 কিলোগ্রাম প্রাকৃতিক ইউরেনিয়ামের উপর তাপীয় নিউট্রন বর্ষণ করা হয়েছে যতক্ষণ পর্যন্ত না এর মোট U^{235}এর শতকরা 5 ভাগের বিদারণ ঘটে গেছে। এর ফলে কত পরিমাণ Tc^{99} (প্রতি বিদারণাপিছু উৎপাদনের হার 6·2%) উৎপন্ন হবে ? [22 মিলিগ্রাম]

দ্বাদশ অধ্যায়

মহাজাগতিক রশ্মি (Cosmic rays)

মহাজাগতিক রশ্মি এবং তৎসংক্রান্ত ঘটনাবলী বর্তমান শতাব্দীতে পদার্থ-বিজ্ঞানে এক অভিনব আবিষ্কার। মহাজাগতিক রশ্মির অস্তিত্ব যখন প্রথম ধরা পড়ল তখন বিজ্ঞানীরা এর স্বরূপ সম্বন্ধে সঠিক অবগত ছিলেন না, এটুকুই শুধু জানা সম্ভব হয়েছিল যে পৃথিবীর বাইরে থেকে আয়নীকরণক্ষম এক ধরণের বিকিরণ বায়ুমণ্ডলে এসে প্রবেশ করছে। পরে অবশ্য নানারকম পরীক্ষার দ্বারা এর যথার্থ প্রকৃতি নির্দ্ধারণ করা সম্ভব হয়েছে। মহাজাগতিক রশ্মি বলতে বোঝায় মহাকাশ থেকে আগত তীব্রশক্তিশালী কতগুলি কণার প্রবাহ যেগুলি পৃথিবীর বায়ুমণ্ডলের পরমাণুগুলির সঙ্গে ক্রিয়া ক'রে আরও নূতন নূতন কণা এবং বিকিরণ উৎপন্ন করে। নানা পরীক্ষায় প্রমাণিত হয়েছে যে বহিরাগত এইসব কণাগুলির অধিকাংশই হ'ল প্রোটন ও কতগুলি ভারী কেন্দ্রীন, এইসব উচ্চশক্তিসম্পন্ন আগন্তুক কণার দ্বারা আয়নীভবনের ফলে বায়ুমণ্ডলে সবসময়ই কিছু আয়নের উপস্থিতি থাকে। বায়ুমণ্ডলের আয়নীভবন বহুদিন থেকেই বিজ্ঞানীদের জ্ঞাত ছিল, দেখা গেছে একটি স্বর্ণপত্র বিদ্যুৎমাপনীকে আহিত অবস্থায় বেশীদিন রাখা যায় না, আস্তে আস্তে আপনাথেকেই এর আধানের ক্ষয় হতে থাকে। আধানের যে এইপ্রকার ক্ষয় হতে থাকে তার কারণ বায়ুমণ্ডলের ভিতর যে আয়নগুলি আছে সেগুলি স্বর্ণপত্রদ্বয়ের সংস্পর্শে এসে ক্রমাগত এদের ভিতর থেকে আধান অপসারিত করতে থাকে। প্রথম প্রথম বিজ্ঞানীরা এই ঘটনাটির ব্যাখ্যা দিতে চেষ্টা করেছিলেন এইভাবে যে, পৃথিবীর উপরিতলের সর্বত্র এবং বায়ুমণ্ডলে সামান্য পরিমাণে তেজস্ক্রিয় পদার্থের অস্তিত্ব আছে এবং এদের তেজস্ক্রিয়তার দরুণ পৃথিবীতলের নিকটবর্ত্তী বায়ুমণ্ডল সবসময়ই অল্প পরিমাণে আয়নিত থাকবে। স্বর্ণপত্র বিদ্যুৎমাপনীর চারিদিকে সীসার পাত দিয়ে বেষ্টন ক'রে দিলে দেখা যায় আধানের ক্ষয়ের হার হ্রাস পায়, এথেকেও বোঝা যায় অন্ততঃ কিছু পরিমাণ বিকিরণ বাইরে থেকে বিদ্যুৎমাপনীর ভিতর এসে ঢুকছে। এই ধারণা অনুযায়ী বায়ুমণ্ডলের যত ঊর্দ্ধে ওঠা যায় ততই আয়নীভবনের পরিমাণ ক্রমশঃ কমতে থাকবে। আয়নীকরণক্ষম বিকিরণগুলি সত্যিই পৃথিবীজাত কিংবা পৃথিবীর বহিরাগত তা

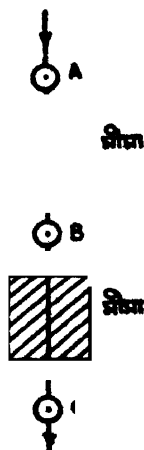
নিঃসংশয়ে প্রমাণ করার জন্য অস্ট্রিয়ান বিজ্ঞানী হেস (Hess) একটি স্পর্শকাতর বিদ্যুৎমাপনী নিয়ে বেলুনে চড়ে বায়ুমণ্ডলের বহু ঊর্দ্ধে আরোহণ করেন। হেস (এবং পরে কোলহোরস্টার) লক্ষ্য করেন যে কিছুদূর পর্যন্ত এই আয়নীভবনের তীব্রতা সামান্য কমে যেতে থাকে, কিন্তু আরও ঊর্দ্ধে উঠলে আয়নীভবন আবার ক্রমশঃ বৃদ্ধি পায়। 5,000 মিটার উচুতে আয়নীভবনের ঘনত্ব পৃথিবীতলের ঘনত্বের তুলনায় চারগুণ বেশী, 9000 মিটার উচুতে উঠলে তা হয় বারোগুণ বেশী। এইসব পরীক্ষা থেকে হেস্ সিদ্ধান্তে উপনীত হলেন যে আয়নীকরণশীল বিকিরণ আসলে পৃথিবীর বাইরে থেকে বায়ুমণ্ডলে প্রবেশ করছে। এর পর মিলিকান বেলুনের সাহায্যে স্পর্শকাতর যন্ত্রপাতি নিয়ে এই ধরণের আরও অনেক পরীক্ষা করেন। ঐসব পরীক্ষা থেকে হেসের প্রকল্প আরও দৃঢ়ভাবে সুপ্রতিষ্ঠিত হয়। কিন্তু বহিরাগত এইসব বিকিরণের স্বরূপ তখন সম্পূর্ণ অজ্ঞাত ছিল, মিলিকান মহাকাশ থেকে আগত এই অজ্ঞাত বিকিরণের নামকরণ করেন মহাজাগতিক রশ্মি।

নরম এবং কঠিন অংশ (Hard & soft components)

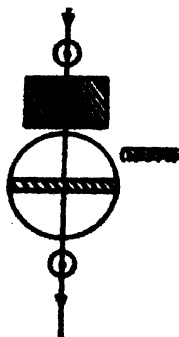
শীঘ্রই লক্ষ্য করা গেল যে সমুদ্রতলে মহাজাগতিক রশ্মির মধ্যে মূলতঃ দুই ধরণের বিকিরণের অস্তিত্ব আছে। এক ধরণের রশ্মির অন্তর্গমন ক্ষমতা খুব কম, কয়েক মিলিমিটার পুরু সীসার পাতের দ্বারাই ঐ রশ্মিগুলি সম্পূর্ণ প্রশমিত ক'রে ফেলা যায়। আবার আরেকধরণের রশ্মি আছে যাদের অন্তর্গমন ক্ষমতা খুব বেশী, এরা এক মিটার পুরু সীসার পাতও সহজে ভেদ ক'রে চলে যেতে পারে। এই দুই ধরণের বিকিরণকে যথাক্রমে মহাজাগতিক রশ্মির নরম এবং কঠিন অংশ আখ্যা দেওয়া হয়েছে, এই পরীক্ষাগুলি পরবর্ত্তী কালে সাধারণতঃ গাইগার-মূলার গণনকারের সাহায্যে করা হয়েছে, একটি গণনকারকে কয়েক মিলিমিটার পুরু সীসার পাত দ্বারা আবৃত করলে দেখা গেছে এর গণনার সংখ্যা যথেষ্ট পরিমাণে হ্রাস পায়। কিন্তু এরপর সীসার পুরুত্ব অনেকখানি বাড়িয়ে গেলেও গণনার হার বিশেষ কমে না। নরম এবং কঠিন অংশের শোষণের প্রকৃতির মধ্যে আরও পার্থক্য লক্ষ্য করা যায়, যেখানে বিভিন্ন শোষকের সমপরিমাণ ভর প্রায় সমভাবে কঠিন অংশ শোষণ করে, নরম অংশের ক্ষেত্রে দেখা যায় যে অধিক পারমাণবিক সংখ্যা-বিশিষ্ট পদার্থগুলি এগুলিকে শোষণ করতে অপেক্ষাকৃত বেশী কার্য্যকরী। এজন্যই নরম অংশের রশ্মিগুলির সবচেয়ে কার্য্যকরী শোষক হ'ল সীসা। পরবর্ত্তী যুগে তাৎক্ষণিকতা বর্জনী ব্যবহার ক'রে নরম ও কঠিন অংশের রশ্মিগুলিকে পরীক্ষা ক'রে এদের শোষণের হার এবং তীব্রতা পৃথক পৃথক ভাবে

নির্ণয় করা সম্ভব হয়েছে। বিভিন্ন উচ্চতায় এবং মাটির নীচে বিভিন্ন গভীরতায় পরীক্ষা ক'রে এদের তীব্রতা নির্ণয় করা হয়েছে। দেখা যায় যে নরম অংশের তীব্রতা উচ্চতার সঙ্গে সঙ্গে দ্রুত বৃদ্ধি পায় এবং গভীরতার সাথে সাথে অতিদ্রুত হ্রাস পায়, কিন্তু ঐসব ক্ষেত্রে কঠিন অংশের রশ্মির তীব্রতার ব্যতিক্রম হয় তুলনামূলকভাবে অনেক কম। মেঘকক্ষের ভিতর মহাজাগতিক রশ্মির অন্তর্গত নানাবিধ আহিত কণার গতিপথের ছবি তোলা হয়েছে এবং তাথেকে প্রমাণ হয় যে এই রশ্মি আসলে শক্তিশালী আহিতকণা এবং গামারশ্মির প্রবাহ। এর নরম অংশ ইলেকট্রন পজিট্রন এবং স্বল্পশক্তিবিশিষ্ট গামারশ্মির দ্বারা গঠিত, এরা কোন প্রাথমিক শক্তিশালী কণার আয়নীকরণ বা ক্ষরণের দ্বারা সৃষ্টি হয়। যথেষ্ট শক্তিশালী হলে এরা নিজেরাও আরও নূতন নূতন ইলেকট্রন পজিট্রন ও গামারশ্মি উৎপন্ন করতে পারে। তাত্ত্বিক বিশ্লেষণের দ্বারা দেখান যায় যে অত্যধিক শক্তিশালী ইলেকট্রন বা পজিট্রনও স্বরণবিকিরণের ফলে সীসার স্বল্প পুরুত্বের মধ্যেই এদের সমস্ত শক্তি নিঃশেষিত ক'রে ফেলবে।

মহাজাগতিক রশ্মির মধ্যে যে অত্যধিক অন্তর্গমনক্ষম প্রচণ্ড শক্তিবিশিষ্ট কিছু কণার অস্তিত্ব আছে তা বিজ্ঞানী রোসি একটি সুন্দর সহজ পরীক্ষার সাহায্যে প্রদর্শন করেন। 12·1 চিত্রে এই পরীক্ষাটি বর্ণনা করা হয়েছে। তিনটি গণনকার A, B এবং C এবং এদের মধ্যে দুটি সীসার পাতের প্রতিবন্ধক, এই নিয়ে পরীক্ষার আয়োজন। সীসার প্রতিবন্ধকগুলি কতগুলি পাশাপাশি সাজান সীসার পাতে গঠিত এবং এদের মিলিত পুরুত্ব এক মিটার পর্যন্ত হতে পারে। তিনটি গণনকার বৈদ্যুতিক বর্তনীর দ্বারা পরস্পরের সঙ্গে সংযুক্ত আছে যা ছবিতে অবশ্য দেখান হয়নি। বৈদ্যুতিক বর্তনীর সাহায্যে তাৎক্ষণিকতা আয়োজনের ব্যবস্থা করা যেতে পারে, তখন যেসমস্ত ক্ষেত্রে একটি কণা একই সঙ্গে একের পর এক তিনটি গণনকারের ভিতর দিয়েই চলে যায় যেমন বোঝান হয়েছে তীর-চিহ্নিত রেখাটির সাহায্যে, শুধু সেই ঘটনাগুলিই গণ্য হবে। অর্থাৎ একই সঙ্গে যদি তিনটি গণনকারের ভিতরই বিভবব্যত্যয়ের সৃষ্টি হয় শুধু তাহলেই সমগ্র ঘটনাটি একটি গণনা হিসাবে বৈদ্যুতিক বর্তনীর ভিতর ধরা পড়বে। কণাটি যদি A গণনকারের ভিতর প্রবেশ করে কিন্তু B ও C গণনকারদ্বয়ের ভিতর দিয়ে যেতে সক্ষম না হয়, অথবা A ও B এর ভিতর দিয়ে যায় কিন্তু C-এর ভিতর দিয়ে যেতে সক্ষম না হয়, তবে সেই ঘটনাগুলি এই বর্তনীর আয়োজনের ভিতর ধরা পড়বে না। সুতরাং এর দ্বারা শুধুমাত্র সেইসব কণাগুলিই গণ্য হবে যেগুলি চিত্রে

প্রশমিত সীসার স্তূপ দুটি অতিক্রম করতে সক্ষম। রোসি প্রথমে সীসার মোট পুরুত্ব 25 সেণ্টিমিটার নিয়ে পরীক্ষা শুরু করেন এবং পরে তা ক্রমশঃ বাড়িয়ে এক মিটার পর্যন্ত করেন। এর ফলে দেখা যায় যে 25 সেমি পুরুত্বে যে পরিমাণ কণা বর্তনীর ভিতর ধরা পড়েছিল, পুরুত্বের পরিমাণ এক মিটার করাতে তাদের পরিমাণ কমে গিয়ে দাঁড়ায় পূর্ববর্তী পরিমাণের শতকরা 60 ভাগ। 25 সেণ্টি-মিটার পুরু সীসার স্তূপ মহাজাগতিক রশ্মির তীব্রতা প্রায় অর্দ্ধেক প্রশমিত ক'রে ফেলতে পারে, কিন্তু তারপর এই পুরুত্ব বাড়িয়ে 100 সেণ্টিমিটার করলেও তীব্রতা খুব বেশী হ্রাস পায় না, এথেকে বোঝা যায় যে কঠিন অংশের অধিকাংশ ভাগই তীব্র অন্তর্গমনক্ষম বিকিরণের দ্বারা গঠিত।

চিত্র 12·1

তাৎক্ষণিকতা বর্তনীর সহযোগে মেঘকক্ষ ব্যবহার ক'রে মহাজাগতিক রশ্মির কঠিন অংশের কণাগুলির গতিপথের ছবিও তোলা সম্ভব। এক্ষেত্রে দুটি তাৎক্ষণিকতা আয়োজনের দ্বারা যুক্ত গণনকারের মধ্যবর্তী অঞ্চলে একটি মেঘকক্ষ রাখা হয়, গণনকারদ্বয়ের মাঝে যথেষ্ট পরিমাণে পুরু সীসার পাত রাখলে তীব্রশক্তিসম্পন্ন কঠিন অংশের কণাগুলি এই বর্তনীর সাহায্যে বেছে নেওয়া যায়। কণাটি যখন একসঙ্গে উভয় গণনকারের ভিতর দিয়েই চলে যায় তখন বর্তনীর ভিতর একটি সঙ্কেতের সৃষ্টি হয় যা মেঘকক্ষটিকে তৎক্ষণাৎ ক্রিয়াশীল ক'রে তোলে। এইভাবে তাৎক্ষণিকতা আয়োজনের সহযোগের ফলে মেঘকক্ষের ভিতর প্রতিবার ছবি ওঠার সময় একটি ক'রে অন্তর্গমনক্ষম কণার গতিপথের ছবি তাতে ধরা পড়ে। অনেকসময় সীসা

ইত্যাদি প্রতিবন্ধকের ভিতর কণাটি কিভাবে শক্তিক্ষয় করে তা পরীক্ষা করার জন্য মেঘকক্ষের অভ্যন্তরেও এক বা একাধিক প্রতিবন্ধকের পাত রাখা

চিত্র 12·2 : কঠিন অংশের পরীক্ষার জন্য মেঘকক্ষের আয়োজন।

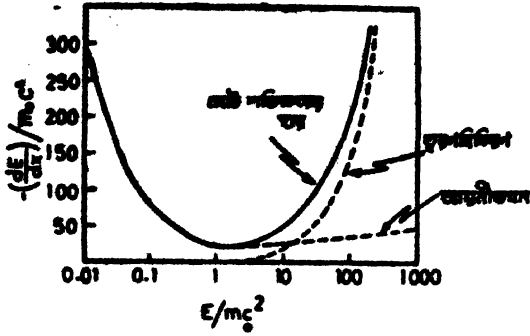
হয়। 12·2 চিত্রে এই আয়োজনের ছকটি দেখান হয়েছে, মেঘকক্ষের ভিতর তীব্র চৌম্বকক্ষেত্র প্রয়োগ ক'রে কণার গতিপথটিকে বাঁকান যেতে পারে। চৌম্বকক্ষেত্রের ভিতর কণাটির গতির সূত্র হিসাবে আমরা লিখতে পারি

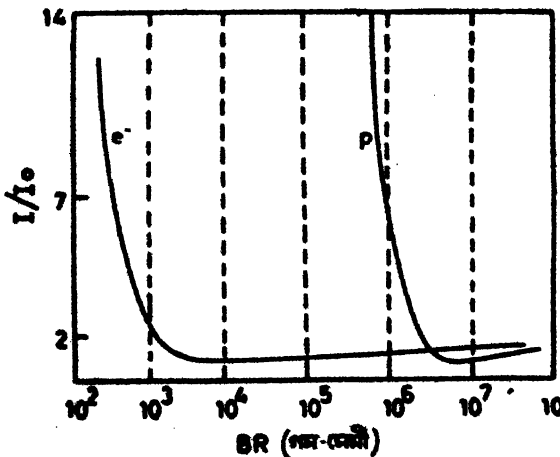
$$BR = mvc/e \qquad \cdots \qquad 12·1$$

এখানে যথারীতি B চৌম্বকক্ষেত্রের তীব্রতা, R ক্ষেত্রের ভিতর কণাটির গতিপথের বক্রতার ব্যাসার্দ্ধ, m এবং e যথাক্রমে এর ভর এবং আধান। BR রাশিটিকে বলা হয় কণাটির চৌম্বক দৃঢ়তা। স্পষ্টতঃই কণাগুলির চৌম্বক দৃঢ়তা এদের ভরবেগের সমানুপাতী, চৌম্বক দৃঢ়তা ও আধানের পরিমাণ থেকে এদের ভরবেগ নির্ণয় করা যায়।

পজিট্রন (Positron)

চৌম্বকক্ষেত্র সমন্বিত মেঘকক্ষের দ্বারা মহাজাগতিক রশ্মির অভ্যন্তরস্থ কণাগুলির ভরবেগ নির্দ্ধারণ করা সহজ কিন্তু এদের ভরের পরিমাপ করা অপেক্ষাকৃত কঠিন। ভর সঠিকভাবে পরিমাপ করতে হলে বিভিন্ন আধান, ভর ও শক্তিবিশিষ্ট কণাগুলি পদার্থের ভিতর কিভাবে শক্তিক্ষয় করে তার সম্যক্ জ্ঞান থাকা দরকার। ভর নির্দ্ধারণের জন্য সাধারণতঃ স্বল্পশক্তিবিশিষ্ট কণাদের উপর পর্যবেক্ষণ করা হয়, ঐসব শক্তিতে কণাগুলির শক্তিক্ষয় মূলতঃ আয়নীভবনের দ্বারাই ঘটে থাকে, এজন্য আয়নীভবনজনিত শক্তিক্ষয়ের প্রকৃতি সম্বন্ধে সঠিক জ্ঞান থাকা একান্ত প্রয়োজন। সমুদ্রতলে যেসমস্ত মহাজাগতিক

রশ্মিকণা সৃষ্ট হয় তাদের সবারই আধান ইলেকট্রনের আধানের পরিমাণের সমান, এজন্য প্রয়োজনীয় জ্ঞাতব্য বিষয় হ'ল কিভাবে একই আধান e কিন্তু বিভিন্ন ভরসমন্বিত কণাগুলি পদার্থের ভিতর আয়নীভবনের দ্বারা শক্তিক্ষয়

চিত্র 12·3 : ত্বরণবিকিরণ ও আয়নীভবন পদ্ধতিতে ইলেকট্রনের শক্তিক্ষয়ের হার।
[Heitler, W., *Quantum Theory of Radiation*, New York, Oxford University Press (1944)]

করে। শক্তিক্ষয়ের প্রকৃতি 12·4 এবং 12·7 লেখচিত্রে বোঝান হয়েছে, এখানে মানক চাপ ও তাপমাত্রায় বাতাসের ভিতর আয়নীভবনের ঘনত্ব কণাগুলির চৌম্বক দৃঢ়তার অপেক্ষক হিসাবে প্রকাশ করা হয়েছে। I হ'ল আয়নীভবনের ঘনত্ব এবং I_0 একটি মানক আয়নীভবন ঘনত্ব, আয়নীভবন ঘনত্ব কণাটির গতিপথে প্রতি সেন্টিমিটারে কতটা শক্তিক্ষয় হয় তা নির্দেশ করে। লেখচিত্রগুলি থেকে

চিত্র 12·4 : ইলেকট্রন ও প্রোটনের আয়নীভবন ঘনত্বের লেখ। I_0 ন্যূনতম আয়নীভবন ঘনত্ব।

বোঝা যায় যে, প্রত্যেক কণারই একটি ন্যূনতম আয়নীভবন ঘনত্ব রয়েছে এবং বিভিন্ন কণার ক্ষেত্রে এই পরিমাণ প্রায় সমান। I_0 এই ন্যূনতম আয়নীভবনের ঘনত্বকে নির্দেশ করে। বিভিন্ন ভরবেগ অবস্থায় কণাগুলি কোন পদার্থের ভিতর কিভাবে শক্তিক্ষয় করে তা তাত্ত্বিক বিশ্লেষণের দ্বারা নির্ধারণ করা সম্ভব, এইসব বিশ্লেষণের সাহায্য নিয়েই উপরিলিখিত লেখগুলি অঙ্কন করা হয়েছে। এগুলি থেকে স্পষ্টই প্রতীয়মান হয় যে, একই ভরবেগে বিভিন্ন ভর-বিশিষ্ট কণার আয়নীকরণের মধ্যে ব্যাপক পার্থক্য রয়েছে, এই পার্থক্য লক্ষ্য ক'রে কণাগুলির ভর সম্বন্ধে অবগত হওয়া যায়।

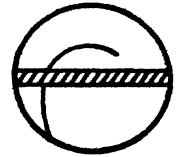
আয়নীভবন ছাড়া স্বরণবিকিরণ পদ্ধতিতেও কণাদের শক্তিক্ষয় হয়, এক্ষেত্রেও তাত্ত্বিক উপায়ে কোন মাধ্যমের ভিতর নির্দিষ্ট পরিমাণ ভর এবং আধান সমন্বিত একটি কণার স্বরণবিকিরণজনিত শক্তিক্ষয়ের পরিমাণ গণনা ক'রে বের করা যায়। একই আধানবিশিষ্ট কণাদের ক্ষেত্রে ভর যত কম হয় স্বরণবিকিরণজনিত শক্তিক্ষয় হয় তত বেশী, এজন্যই ইলেকট্রনের স্বরণবিকিরণ-জনিত শক্তিক্ষয় সর্বাধিক। প্রোটনের ক্ষেত্রে এই শক্তিক্ষয়ের পরিমাণ অনেক কম, কয়েক বিইভি শক্তির কমে এদের স্বরণবিকিরণ শুরু হয় না। স্বরণবিকিরণের পরিমাণ কণাটির শক্তির সঙ্গে সঙ্গে বৃদ্ধি পেতে থাকে, যে পদার্থের ভিতর শক্তিক্ষয় ঘটে তার পারমাণবিক সংখ্যার সঙ্গে সঙ্গেও তা দ্রুত বৃদ্ধি পায়। স্বরণবিকিরণের দ্বারা অতিরিক্ত শক্তিক্ষয় ঘটার ফলে দেখা যায় যে এক সেন্টিমিটার পুরু সীসার পাত প্রায় যেকোন শক্তির ইলেকট্রনকেই সম্পূর্ণ থামিয়ে দিতে সক্ষম হয়।

কোন একটি মাধ্যমের ভিতর একটি আহিত কণার শক্তিক্ষয়ের হার হবে এর আয়নীকরণ এবং স্বরণবিকিরণজনিত শক্তিক্ষয়ের হারের যোগফল যদি আমরা অন্যান্য পরিক্রিয়া, যেমন মেসন উৎপাদন ইত্যাদি, অবহেলা করি।

$$\left(-\frac{dF}{dx}\right)_{\text{মোট}} = \left(-\frac{dE}{dx}\right)_{\text{আয়নীভবন}} + \left(-\frac{dE}{dx}\right)_{\text{স্বরণবিকিরণ}}$$

12·3 চিত্রে সীসার ভিতর ইলেকট্রনের বিভিন্নপ্রকার শক্তিক্ষয়ের হারগুলির লেখচিত্র অঙ্কন করা হয়েছে, এই লেখগুলি তাত্ত্বিক গণনার সাহায্যে প্রস্তুত করা হয়েছে, এখানে m_0 = ইলেকট্রনের স্থিরভর। অধিক শক্তিতে যে মোট শক্তিক্ষয়ের হার অতি দ্রুত বৃদ্ধি পায় তার মূল কারণ হ'ল বিকিরণজনিত শক্তিক্ষয় বা পারমাণবিক সংখ্যা Z-এর বর্গের সমানুপাতী হয়। আয়নীভবন-

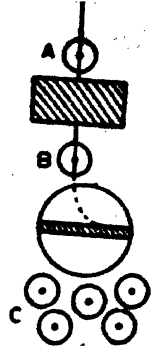
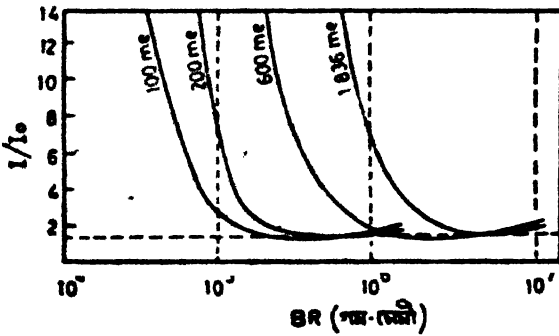
জনিত শক্তিক্ষয়ের হার হয় Z-এর সমানুপাতী। অন্যান্য শোষকের ক্ষেত্রেও এই লেখগুলির প্রকৃতি একই রকম হয়।

আয়নীভবন এবং ত্বরণীবিকিরণজনিত শক্তিক্ষয়ের তারতম্য লক্ষ্য ক'রে মহাজাগতিক রশ্মির ভিতর একাধিক বিভিন্ন কণা আবিষ্কৃত হয়েছে। কৃত্রিম উপায়ে প্রস্তুত কোন কোন তেজস্ক্রিয় আইসোটোপের ক্ষরণে পজিট্রন নির্গত হয় তা আগে বলা হয়েছে, কিন্তু তেজস্ক্রিয়তার মধ্যে পজিট্রন নির্গমন লক্ষিত হবার পূর্ব্বেই মহাজাগতিক রশ্মির উপর পরীক্ষায় পজিট্রন আবিষ্কৃত হয়। পজিট্রন আবিষ্কার করেন মার্কিন বিজ্ঞানী এ্যাণ্ডারসন (Anderson)। তিনি একটি মেঘকক্ষের ভিতর পজিট্রনের পথরেখার ছবি তুলতে সক্ষম হন, মেঘকক্ষটিতে 24 কিলোগস চৌম্বকক্ষেত্র ব্যবহার করায় তার সাহায্যে কণাটির ভরবেগও মাপা সম্ভব হয়। এ্যাণ্ডারসনের তোলা একটি ছবিতে দেখা যায় যে, একটি সীসার পাত অতিক্রম করার ফলে একটি আয়নীকরণক্ষম কণার গতিপথের বক্রতার ব্যাসার্দ্ধ বৃদ্ধি পেয়েছে, সুতরাং এথেকে কণাটি কোন্ দিকে ভ্রমণ করছে তা বোঝা যায় এবং এটি চৌম্বকক্ষেত্রে কোন্ দিকে বাঁকছে তা লক্ষ্য ক'রে এর আধানের প্রকৃতি সম্বন্ধে নিশ্চিত হওয়া যায়। এ্যাণ্ডারসনের তোলা ছবিটি থেকে বোঝা যায় যে কণাটি ধন-আহিত, গতিপথের উপর আয়নীভবন ঘনত্ব এবং বক্রতার ব্যাসার্দ্ধ মেপে দেখা যায় যে কণাটির ক্ষেত্রে ভরবেগ এবং আয়নীভবনের মধ্যে সম্বন্ধ 12·4 চিত্রের ইলেকট্রনের লেখটির সঙ্গে সম্পূর্ণ সামঞ্জস্যপূর্ণ (e^+ ও e^- এর আয়নীভবনের প্রকৃতির মধ্যে বিশেষ কোন পার্থক্য নেই)। এথেকে সিদ্ধান্ত করা যায় যে কণাটির ভর ইলেকট্রনের ভরের সমান, এর আধানও ইলেকট্রনের সমান কিন্তু বিপরীত চিহ্নবিশিষ্ট, এভাবেই পরীক্ষাগারে প্রথম পজিট্রন আবিষ্কৃত হয়। এই আবিষ্কারের বহু আগেই বিজ্ঞানী ডির‍্যাক তাত্ত্বিক গবেষণায় পজিট্রনের অস্তিত্ব সম্বন্ধে ভবিষ্যদ্বাণী করেন।

চিত্র 12·5

মিউমেসন (μ-meson)

পজিট্রন আবিষ্কারের পর থেকে আরও নূতন নূতন কণার সন্ধান লাভের আশায় বিভিন্ন দেশের বিজ্ঞানীরা মহাজাগতিক রশ্মির উপর আরও ব্যাপক গবেষণা আরম্ভ করেন। এক্ষেত্রেও এ্যাণ্ডারসন এবং তাঁর সহকর্মী নেডারমেয়ার (Neddermeyer) সর্ব্বপ্রথম মহাজাগতিক রশ্মির কঠিন অংশের মধ্যে যে ইলেকট্রনের চেয়ে ভারী অথচ প্রোটনের তুলনায় হাল্কা একধরণের কণার

অস্তিত্ব আছে তা প্রমাণ করতে সক্ষম হন। এঁদের পরীক্ষার আয়োজন ঠিক 12·2 চিত্রের আয়োজনের অনুরূপ। তাৎক্ষণিকতা বর্ত্তনীর দ্বারা চালিত একটি মেঘকক্ষের অভ্যন্তরে আড়াআড়িভাবে রাখা একটি সীসার পাতের ভিতর দিয়ে যাবার সময় কঠিন অংশের কণাগুলি কি পরিমাণে শক্তিক্ষয় করে তা লক্ষ্য করা হয়। সীসার পাত অতিক্রম করার আগে এবং পরে কণাটির গতিপথের বক্রতার ব্যাসার্দ্ধ কত তা দেখে এর ভরবেগের কতটা পরিবর্ত্তন ঘটছে তা বুঝতে পারা যায়। কতগুলি কণা যে বিশেষ শক্তিক্ষয় না ক'রে 3·5 মিলিমিটার পুরু সীসার পাত অতিক্রম ক'রে বেরিয়ে যেতে পারে তাথেকে প্রমাণিত হয় যে এরা ইলেকট্রন হতে পারে না, কারণ সমপরিমাণের ভরবেগ সমন্বিত ইলেকট্রন সীসার ভিতর ঐ দূরত্ব অতিক্রম করতে বিপুল পরিমাণ শক্তিক্ষয় করবে। সুতরাং বোঝা যায় যে এই কণাগুলির ভর ইলেকট্রনের তুলনায় বহুগুণ বেশী। একই পরীক্ষা পরে 1 সেণ্টিমিটার পুরু প্লাটিনাম পাতের সাহায্যে করা হয়েছে যা ক্ষরণবিকিরণের ব্যাপারে 2 সেণ্টিমিটার পুরু সীসার পাতের সমতুল্য এবং এই পরীক্ষাতেও ঐ একই সিদ্ধান্তে উপনীত হওয়া যায়। কিন্তু আবার অপেক্ষাকৃত স্বল্পশক্তিবিশিষ্ট কণাগুলি (চৌম্বক-দৃঢ়তা $1{\cdot}5\times10^{6}$ গস-সেমি এবং এর কম) দ্বারা সৃষ্ট আয়নীভবন ঘনত্ব পরীক্ষা ক'রে দেখা যায় যে এই আয়নীভবনের পরিমাণ সমশক্তিবিশিষ্ট প্রোটনের দ্বারা আয়নীভবনের মাত্র এক-তৃতীয়াংশ। 12·6 চিত্রে যে আয়নীভবন বনাম চৌম্বকদৃঢ়তার সম্বন্ধগুলি আঁকা হয়েছে সেগুলি লক্ষ্য করলেই বোঝা যাবে যে উপরোক্ত অবস্থায় স্পষ্ট সিদ্ধান্ত করা সম্ভব যে কণাটির ভর প্রোটনের তুলনায় কম। সুতরাং বোঝা যায় যে মহাজাগতিক রশ্মির অন্তর্গমনশীল অংশে এমন কিছু আহিত কণার অস্তিত্ব আছে যাদের ভর প্রোটন এবং ইলেট্রনের ভরের মধ্যবর্ত্তী। সীসা কিংবা বাতাসের ভিতর একটি আহিত কণার দ্বারা বিভিন্ন প্রক্রিয়ার মাধ্যমে শক্তিক্ষয়ের পরিমাণ জটিল তাত্ত্বিক পদ্ধতিতে অত্যন্ত নির্ভুলভাবে গণনা করা যায়, এইসব গণনা প্রয়োগ ক'রে বিভিন্ন পরীক্ষায় প্রাপ্ত ফলাফল থেকে একটি কণার প্রকৃতি, যেমন এর আধান, ভর ইত্যাদি নির্দ্ধারণ করা যায়। তবে কণার ভর নির্ভুলভাবে পরিমাপ করতে হলে খুব স্বল্পশক্তি অবস্থায় একে লক্ষ্য করা দরকার, কারণ তখন শক্তিক্ষয় হয় শুধু আয়নীভবনের দ্বারা এবং 12·7 চিত্রের লেখগুলির সাহায্যে নির্ভুলভাবে ভর পরিমাপ করা যায়। কিন্তু এ্যাণ্ডারসন ও নেডারমেয়ারের পরীক্ষায় খুব স্বল্পশক্তিবিশিষ্ট কণাগুলির উপর পরীক্ষা করার কোন আয়োজন ছিল না, এজন্য এই পরীক্ষায় কণাটির ভর নির্ভুলভাবে মাপা সম্ভব হয়নি।

এই পরীক্ষায় একটি নূতন কণার অস্তিত্ব নিঃসন্দেহে প্রমাণিত হবার পর স্ট্রীট এবং স্টীভেনসন (Street and Stevenson) এই কণাটির ভর মাপার জন্য নূতন একটি পরীক্ষা করেন; এঁদের পরীক্ষার আয়োজন 12·6 চিত্রে দেখান হয়েছে। পরীক্ষার জন্য কণাগুলিকে এমন সব শক্তিতে লক্ষ্য করতে হবে যেখানে এদের শক্তিক্ষয় হয় শুধু আয়নীভবনের দ্বারা, স্বরণবিকিরণজনিত ক্ষয়ের পরিমাণ হয় শূন্য, অর্থাৎ কণাটির গতিশক্তি খুবই কম হওয়া বাঞ্ছনীয়। স্ট্রীট এবং স্টীভেনসন এমন একটি বর্তনী উদ্ভাবন করেন যার সহায়তায় একমাত্র যেসব কণাগুলি মেঘকক্ষের ভিতর এসে থেমে যায় তাদেরই ছবি উঠতে পারে। 12·6 চিত্রের আয়োজনের দ্বারা এরকম ঘটান সম্ভব, এখানে বর্তনীর আয়োজন হ'ল এমন যে, যেসব ক্ষেত্রে কণাগুলি A এবং B এই দুটি গণনকারের ভিতর দিয়ে চলে যায় কিন্তু C-শ্রেণীর গণনকারগুলির

চিত্র 12·6 স্ট্রীট ও স্টীভেনসনের পরীক্ষার আয়োজন।

চিত্র 12·7

অসমান ভর কিন্তু ইলেকট্রনের সমান আধানবিশিষ্ট বিভিন্ন সম্ভাব্য কণাদের বায়ুর ভিতর আয়নীভবন ঘনত্বের লেখ।

কোনটির মধ্যেই প্রবেশ করে না, শুধু সেইসব ক্ষেত্রেই মেঘকক্ষটি ক্রিয়াশীল হয়ে উঠবে। এর অর্থ হ'ল, যেসব কণা A এবং B গণনকার এবং এদের অন্তর্বর্তী সীসার পাত ভেদ ক'রে এসে মেঘকক্ষের ভিতর প্রবেশ ক'রে থেমে যায় শুধু তাদেরই গতিপথের ছবি এতে উঠবে। কণাগুলি যেহেতু মেঘকক্ষের ভিতর থেমে যায় এজন্য কক্ষের ভিতর এদের শক্তি হয় কম এবং শক্তিক্ষয় সেখানে শুধু আয়নীভবনের দ্বারাই ঘটে। মেঘকক্ষের ভিতর চৌম্বকক্ষেত্র প্রয়োগ ক'রে কণাগুলির চৌম্বকদৃঢ়তা মাপা হয়।

12·7 লেখচিত্রে বিভিন্ন ভর সমন্বিত কণার বিভিন্ন চৌম্বকদৃঢ়তার আয়নীভবনের প্রকৃতি দেখান হয়েছে, সবার ডানদিকের লেখটি হ'ল প্রোটনের আয়নীভবন ঘনত্বের লেখ, এর বাঁদিকে ক্রমশঃ স্বল্পতর ভরবিশিষ্ট বিভিন্ন সম্ভাব্য কণাদের জন্য পৃথক পৃথক লেখ আঁকা হয়েছে, প্রত্যেক কণারই আধান ইলেকট্রনের আধানের সমান ধরা হয়েছে। প্রতিটি কণার ক্ষেত্রেই লেখগুলির ভিতর একটি ন্যূনতম আয়নীভবন ঘনত্ব (I_0) লক্ষ্য করা যায়, যার পর রেখাটি খুব ধীরে ধীরে আবার উঠতে থাকে। এই ন্যূনতম আয়নীভবন অঞ্চলের বাঁদিকে আয়নীভবন দ্রুত বৃদ্ধি পায় এবং সামান্য চৌম্বকদৃঢ়তার ব্যবধানেই ন্যূনতম পরিমাণের বহুগুণ বেশী হয়ে পড়ে। স্ট্রীট এবং স্টীভেনসনের পরীক্ষায় একটি কণার পথরেখা লক্ষ্য করা গেল যার আয়নীভবনের পরিমাণ ন্যূনতম পরিমাণের প্রায় সাতগুণ এবং চৌম্বকদৃঢ়তা $9·6 \times 10^4$ গস-সেমি। 12·7 চিত্রের ভিতর এই বিন্দুটি $200m_e$ ভরবিশিষ্ট কণার আয়নীভবন-লেখটির খুব নিকটে হবে, সুতরাং দৃষ্ট কণাটির ভর হ'ল প্রায় $200m_e$। এই পরীক্ষা থেকেই সর্বপ্রথম এই কণার ভর অপেক্ষাকৃত নির্ভুলভাবে মাপা সম্ভব হয়। কণাটির নাম দেওয়া হয়েছে মিউ (μ)-মেসন, এর অধুনাস্বীকৃত ভরের পরিমাণ

$$m_\mu = 105·65 \text{ এমইভি}$$

$+e$ এবং $-e$ উভয় আধানবিশিষ্ট মিউমেসনেরই অস্তিত্ব আছে, এদের যথাক্রমে μ^+ এবং μ^- আখ্যা দেওয়া হয়। সমুদ্রতলে মহাজাগতিক রশ্মির কঠিন অংশের প্রায় সমস্তই মিউমেসনের দ্বারা গঠিত। মিউমেসন আবিষ্কার অত্যন্ত গুরুত্বপূর্ণ, কারণ এই প্রথম একটি কণার অস্তিত্ব জানা গেল যার ভর ইলেকট্রন এবং প্রোটনের ভরের মধ্যবর্তী, পরে এরকম আরও কতগুলি কণা আবিষ্কৃত হয়েছে এবং এদের অনেকগুলিই আবিষ্কৃত হয়েছে মহাজাগতিক রশ্মির উপর গবেষণা চালিয়ে। আজকাল ত্বরণযন্ত্রের সাহায্যে কৃত্রিম উপায়ে মিউমেসন উৎপন্ন করা হয়।

মিউমেসনের শোষণ

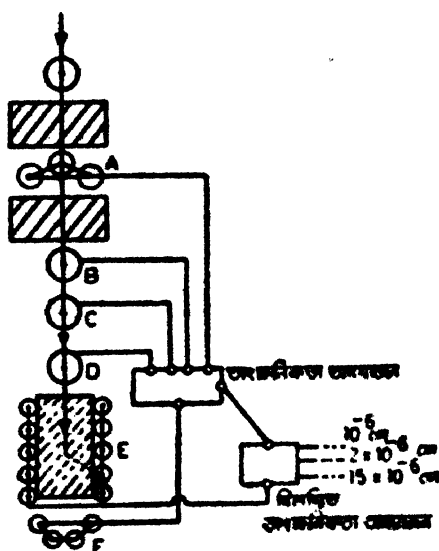
মিউমেসন স্থায়ী কণা নয়, এর ক্ষরণ ঘটে, ক্ষরণের প্রকৃতি নিম্নরূপ

$$\mu^\pm \rightarrow e^\pm + \nu + \nu$$

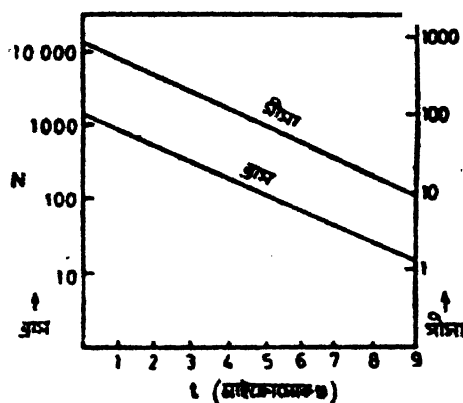
মহাজাগতিক রশ্মির ভিতর দৃষ্ট মিউমেসনের গড় জীবনকাল মাপা সম্ভব হয়েছে। ক্ষরণের প্রথম নিদর্শন পাওয়া যায় বায়ুমণ্ডলের ভিতর এদের শোষণের প্রকৃতি লক্ষ্য ক'রে। আহিত কণাদের শোষণ পরীক্ষা করলে

দেখা যায় যে এদের শোষণ পদার্থের ঘনত্বের উপর নির্ভরশীল। এক সেণ্টিমিটার পুরু জলের আস্তরণ মানক চাপ ও তাপমাত্রায় 800 সেণ্টিমিটার বাতাসের আস্তরণের সমান শোষণশীল। মহাজাগতিক রশ্মির কঠিন অংশ, অপেক্ষাকৃত কম উচ্চতায় যা প্রায় অধিকাংশই মিউমেসনের দ্বারা গঠিত, এদের বায়ুর ভিতর শোষণের প্রকৃতি লক্ষ্য ক'রে দেখা গেল যে অন্যান্য পদার্থের তুলনায় তুল্য পুরুত্বের বাতাসের আস্তরণ মিউমেসন শোষণের পক্ষে অপেক্ষাকৃত বেশী ক্রিয়াশীল। বায়ুর ভিতর শোষণের পরিমাণ লক্ষ্য করা হয় বিভিন্ন উচ্চতায় মিউমেসনের ঘনত্ব লক্ষ্য ক'রে। আশ্চর্য্যের বিষয় এই যে, পরীক্ষায় লক্ষ্য করা যায় যে অধিকতর উচ্চতায় যেখানে বায়ুর ঘনত্ব অনেক কম, সে অঞ্চলের বায়ুমণ্ডলই এই মেসনগুলি শোষণের পক্ষে অধিক ক্রিয়াশীল। সমুদ্রতলে এবং বিভিন্ন উচ্চতায় বায়ুমণ্ডলের ভিতর μ-মেসনের শোষণের প্রকৃতি পরীক্ষা করার জন্য বহু পরীক্ষা করা হয়েছে। 5000 মিটার উচুতে যেখানে বায়ুর ঘনত্ব কমে গিয়ে অর্দ্ধেকে পরিণত হয় সেখানে 1600 সেমি বাতাসের পুরুত্ব 1 সেমি জলের পুরুত্বের সমান শোষণশীল। পাহাড়ের উপর বিভিন্ন উচ্চতায় এবং সমুদ্রতলে ব্যাপকভাবে পরীক্ষা চালিয়ে বিভিন্ন ক্ষেত্রে মিউমেসনের ঘনত্বের পরিমাণ সংগ্রহ করা হয়েছে এবং প্রমাণিত হয়েছে যে সর্ব্বত্রই বায়ুমণ্ডলের ভিতর শোষণ তুল্য পরিমাণ পুরুত্বের জলের আস্তরণের ভিতর শোষণের তুলনায় বেশী। এই পর্য্যবেক্ষণটির ব্যাখ্যা দেওয়া যায় যদি প্রস্তাব করা হয় যে মিউমেসনের এক নির্দ্দিষ্ট জীবনকাল রয়েছে যা আধুনিক পরীক্ষা অনুযায়ী 10^{-6} সেকেণ্ডের নিকটবর্ত্তী। 16,000 সেমি পুরু বাতাসের আস্তরণ ভেদ করতে শক্তিশালী (অর্থাৎ গতিবেগ প্রায় আলোর গতিবেগের সমান) μ-মেসনের যে সময় লাগবে, 10 সেণ্টিমিটার পুরু তুল্য জলের আস্তরণ ভেদ করতে সময় লাগে সে-তুলনায় অনেক কম। বাতাসের দীর্ঘতর পথ অতিক্রম করতে যে অতিরিক্ত সময় লাগে তার মধ্যে যদি বেশ কিছু মিউমেসনের ক্ষরণ ঘটে যায় তাহলে শোষণের পরিমাণ নির্দ্ধারণের পরীক্ষায় মনে হবে যে ঐ পরিমাণ মিউমেসন বায়ুমণ্ডলের ভিতর শোষিত হয়ে গিয়েছে। মিউমেসনের নির্দ্দিষ্ট গড় জীবনকালের প্রকল্প এইভাবে এর শোষণের এই ব্যতিক্রমকে ব্যাখ্যা করতে সক্ষম।

পরবর্ত্তী কালে রসেট্টি (Rasetti) ইলেকট্রনিক পদ্ধতিতে সরাসরিভাবে μ-মেসনের গড় জীবনকাল মাপতে সক্ষম হন। রসেট্টির ব্যবহৃত বর্ত্তনীটি 12.8 চিত্রে দেখান হয়েছে, একটি মিউমেসন কতগুলি সীসার পাত এবং A, B, C, D ইত্যাদি কতগুলি গণনকার অতিক্রম ক'রে অবশেষে একটি

শোষক পদার্থের স্তূপের ভিতর এসে থেমে যায়। থামার পর এর ক্ষরণ ঘটলে একটি ইলেকট্রন কিংবা পজিট্রনের সৃষ্টি হয় যেটি ঐ শোষকের দুপাশে রাখা গণনকার শ্রেণী E-এর কোন একটিকে ক্রিয়াশীল ক'রে তোলে। A, B, C, D গণনকারগুলি পরস্পরের সঙ্গে তাৎক্ষণিকতা আয়োজনে সম্মিলিত এবং এরা প্রত্যেকেই আবার F শ্রেণীর গণনকারগুলির সঙ্গে প্রতীপ তাৎক্ষণিকতা

চিত্র 12·8 : μ-মেসনের গড় জীবনকাল পরিমাপের জন্য রসেটির ব্যবহৃত ইলেকট্রনিক বর্তনীর আয়োজন।

আয়োজনে যুক্ত, অর্থাৎ একটি কণা যদি A, B, C, D গণনকারগুলির ভিতর দিয়ে চলে যায় কিন্তু F গণনকার শ্রেণীর ভিতর পৌঁছুতে না পারে, তবেই শুধু সমগ্র ঘটনাটি গণ্য হবে। সুতরাং স্পষ্টতঃই এই বর্তনীটি শুধু সেসব ঘটনাগুলিই বেছে নেয় যেসব ক্ষেত্রে কণাটি শোষকের স্তূপের ভিতর এসে থেমে যায়। এছাড়া বর্তনীটির মধ্যে আরও একটি আয়োজন এরকম যে, A, B, C, D গণনকারগুলি থেকে যে মুহূর্তে বিভব ব্যত্যয়ের সৃষ্টি হয় তার পরে একটি নির্দিষ্ট সময় বিরতির মধ্যেই যদি E গণনকারগুলির কোনটি থেকে অপর একটি বিভব ব্যত্যয় উৎপন্ন হয়, তবেই শুধু সমগ্র ঘটনাটি বর্তনীর ভিতর গণ্য হবে। E এবং তাৎক্ষণিকতা আয়োজনে যুক্ত গণনকারগুলির মধ্যে নির্দিষ্ট বিলম্ব সৃষ্টি ক'রে রাখা হয়, যদি কণাটি থেমে যাবার পর ঠিক ঐ সময়-বিরতির মধ্যে এর ক্ষরণ ঘটে এবং ক্ষরণোৎপন্ন কণাটি একটি E গণনকারকে ক্রিয়াশীল করে তবেই ঘটনাটি গণ্য হবে। বর্তনীর ভিতর এই বিলম্বের

পরিমাণ পরিবর্তিত ক'রে দেওয়া যায়, 1, 2, 15 মাইক্রোসেকেণ্ড (10^{-6} সেকেণ্ড) ইত্যাদি পরিমাণের বিরতি দেওয়া হয়। পরবর্তী কালে রোসি পুনরায় পরীক্ষাটি করেন, তাঁর ব্যবহৃত বর্ত্তনীটির আয়োজন এমন যাতে কোন নির্দিষ্ট সময়বিরতি t পরে কতগুলি ক্ষরণ ঘটে তা নির্ণয় করা যায়। রোসির পরীক্ষার ফলাফল বর্ণনা করা হয়েছে (12·9 চিত্রে): শুরু থেকে t পরিমাণ সময় অতিক্রান্ত হয়ে যাবার পর মোট যতগুলি ক্ষরণ ঘটে সেই সংখ্যা N, সময় t-এর অপেক্ষক হিসাবে আঁকা হয়েছে। সাধারণ ক্ষরণের সূত্র অনুসারে লগ N বনাম t-এর লেখটি হবে একটি সরলরেখা। সুতরাং 12·9 লেখটি দেখে বোঝা যায় যে μ-মেসনের ক্ষরণও স্বাভাবিক তেজস্ক্রিয় ক্ষরণের নিয়মানুযায়ী ঘটে। M শোষকপাতটি সীসা অথবা ব্রাস হলে দুটি পৃথক কিন্তু সমান্তরাল সরলরেখা পাওয়া যায় যেমন লেখটিতে দেখা যাচ্ছে, এদের আপতন পরিমাপ ক'রে সহজেই গড় জীবনকাল নির্ণয় করা যায়।

চিত্র 12·9 : রোসির পরীক্ষার ফলাফল ; N, মোট ক্ষরণের সংখ্যা যেগুলির ক্ষেত্রে বিলম্বের পরিমাণ t-এর চেয়ে বেশী।

বর্ত্তমানে পরীক্ষাগারে কৃত্রিম উপায়ে উৎপন্ন মিউমেসনের উপর গড় জীবনকাল নির্ণয়ের পরীক্ষা আরও নির্ভুলভাবে করা সম্ভব, অধুনাস্বীকৃত গড় জীবনকালের পরিমাণ হ'ল

$$\tau_\mu = 2·2 \times 10^{-6} \text{ সেকেণ্ড}$$

মিউমেসনের পরিক্রিয়া (Interaction)

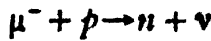
মিউমেসনের আবিষ্কার তাত্ত্বিক গবেষণার দিক থেকে বিশেষ তাৎপর্য্যপূর্ণ কারণ 1932 খ্রীষ্টাব্দে জাপানী বিজ্ঞানী য়ুকাওয়া (Yukawa) কেন্দ্রীনের

* N. G. Nereson & B. Rossi, Phy. Rev., 64, page 199 (1943)

বলের প্রকৃতি সম্বন্ধে একটি তত্ত্বের অবতারণা করেন যাতে প্রস্তাব করা হয় যে কেন্দ্রকণাগুলির ভিতর আকর্ষণী বলের জন্য দায়ী হ'ল এক নূতন ধরণের কণা যার ভর ইলেকট্রন এবং প্রোটনের ভরের মাঝামাঝি, এই কণার বিনিময়ের দ্বারা শক্তিশালী কেন্দ্রীনের বল উৎপন্ন হয়। মিউমেসন আবিষ্কারের পর বিজ্ঞানীরা ভেবেছিলেন এটিই বোধ হয় যুকাওয়া প্রস্তাবিত কেন্দ্রীনের বল সৃষ্টিকারী কণা। তাই যদি হয় তবে এই কণাটি কোন কেন্দ্রীনের সংস্পর্শে এলে অত্যন্ত তীব্রভাবে ক্রিয়া করবে। কিন্তু বিভিন্ন কেন্দ্রীনের সঙ্গে মিউমেসনের পরিক্রিয়া লক্ষ্য ক'রে দেখা গেল যে এই পরিক্রিয়া যুকাওয়া তত্ত্ব অনুযায়ী যতটা আশা করা যায় তার চেয়ে অনেক কম তেজশালী। 12·8 চিত্রের আয়োজনের দ্বারাই মিউমেসনের সঙ্গে বিভিন্ন কেন্দ্রীনের পরিক্রিয়া সম্বন্ধে বিস্তৃতভাবে পরীক্ষা করা যায়, তবে তখন কণাগুলির গতিপথের মাঝখানে বিশেষ চৌম্বকক্ষেত্রের আয়োজন বসিয়ে ধন ও ঋণ -আহিত কণা পৃথক পৃথক ভাবে পরীক্ষার জন্য বেছে নেওয়া হয় এবং বিভিন্ন পদার্থে তৈরী শোষকের পাতের ভিতর এদের শোষণ লক্ষ্য করা হয়। দেখা গেছে যে μ^-, μ^+-এর তুলনায় অনেক বেশী দ্রুত গতিতে কেন্দ্রীনের ভিতর শোষিত হয়। লোহা, সীসা ইত্যাদি যেসব পদার্থের পারমাণবিক সংখ্যা অধিক তাদের ভিতর μ^--মেসনের ক্ষরণ লক্ষ্যই করা যায় না, এরা সম্পূর্ণ শোষিত হয়ে যায়, কিন্তু কার্বন ইত্যাদি স্বল্প পারমাণবিক সংখ্যাবিশিষ্ট পরমাণুময় পদার্থের ভিতর বেশ কিছু μ^--মেসনের ক্ষরণ লক্ষিত হয়। কিন্তু যেকোন পদার্থের ভিতর একই হারে μ^+-মেসনের ক্ষরণ ঘটতে দেখা যায়। শোষণের পরিমাণ পরিমাপের জন্য 12·8 বর্তনীটির সামান্য একটু পরিবর্তন আবশ্যক, সেক্ষেত্রে প্রতীপ তাৎক্ষণিকতা বর্তনী এবং বিলম্বিত তাৎক্ষণিকতা বর্তনী থেকে পৃথক পৃথক দুটি সঙ্কেত উৎপন্ন ও লিপিবদ্ধ করা হয়, তাথেকে বোঝা যায় কতগুলি মিউমেসন শোষক পাতটির ভিতর এসে থামছে এবং তাদের মধ্যে কতগুলি ক্ষরিত হচ্ছে। বাকি কণাগুলি কেন্দ্রীনের সঙ্গে পরিক্রিয়া ক'রে পদার্থের ভিতর শোষিত হয়।

μ^--মেসন যে অধিক হারে পদার্থের ভিতর শোষিত হয় তার কারণ হ'ল এর ঋণ আধান, কুলম্ব বলের প্রভাবে এরা কেন্দ্রীনের দ্বারা আকৃষ্ট হয় এবং একটি ইলেকট্রনকে উৎখাত ক'রে কেন্দ্রীনের চারপাশে আবর্তনশীল অবস্থায় একটি বোরকক্ষে আবদ্ধ হয়ে পড়ে। কেন্দ্রীন ও μ-মেসনের এই আবদ্ধ দশাকে বলা হয় মৌসিক পরমাণু। মেসনগুলি সাধারণতঃ পরমাণুর সর্ববহিস্থ সেলে আবদ্ধ হয়, তারপর ক্রমশঃ ধাপে ধাপে নেমে এসে K-সেলে উপস্থিত হয়।

এদের K-সেলের কক্ষের ব্যাসার্ধ ইলেকট্রনের K-সেলের তুলনায় বহুগুণ কম এজন্য এদের পক্ষে কেন্দ্রীনের বলসমূহের সম্মুখীন হবার সম্ভাবনা খুব বেশী। গণনা ক'রে দেখান সম্ভব যে, মিউমেসন যদি যুকাওয়া কথিত কণা হয় তবে K-সেলে আবর্তিত হওয়াকালীন 10^{-18} সেকেণ্ডের মধ্যেই এটি কেন্দ্রীনের বলের সঙ্গে ক্রিয়া ক'রে শোষিত হবে। কিন্তু কার্বনের ভিতর যেহেতু যথেষ্ট পরিমাণে μ^--মেসনের ক্ষরণ ঘটে তাতে বোঝা যায় যে K-সেলের ভিতর এই মেসনগুলি 10^{-6} সেকেণ্ড যাবৎ অবস্থান করতে পারে। এথেকে বোঝা যায় যে মিউমেসন যুকাওয়া প্রস্তাবিত কণা হতে পারে না। সীসা কিংবা লোহার ক্ষেত্রে যেহেতু K-সেলের কক্ষের ব্যাসার্ধ আরও অনেক কম, সেখানে মেসনগুলির শোষিত হবার সম্ভাবনা অনেক বেশী এবং সেক্ষেত্রে এরা সবই প্রায় শোষিত হয়ে যায়। পরবর্তী কালে প্রমাণিত হয়েছে যে মিউমেসনগুলি নিম্নলিখিত বিক্রিয়ার দ্বারা শোষিত হয়ঃ

$$\mu^- + p \rightarrow n + \nu$$

এই বিক্রিয়াটি কেন্দ্রীনের তীব্র শক্তিশালী আকর্ষণী বলের পরিক্রিয়ার (বিক্রমশীল পরিক্রিয়া) দ্বারা ঘটতে পারে না, কারণ নিউট্রিনো ঐ পরিক্রিয়ায় অংশগ্রহণ করে না।

পাইমেসন (π-meson)

মিউমেসন আবিষ্কারের কিছুকাল পর মহাজাগতিক রশ্মির ভিতর আরেকটি নূতন কণা আবিষ্কৃত হয়, এর ভর মিউমেসনের চেয়ে কিছু বেশী কিন্তু প্রোটনের চেয়ে কম, এর নাম পাই (π)-মেসন। শক্তিশালী আহিত কণা অনুসন্ধানের জন্য ফোটোগ্রাফীর অবদ্রব পদ্ধতির প্রয়োগ সম্বন্ধে আগে বলা হয়েছে, এই পদ্ধতির দ্বারাই সর্ব্বপ্রথম পাইমেসন আবিষ্কৃত হয়। কেন্দ্রীন-ঘটিত বিক্রিয়া কিংবা কেন্দ্রীনের ক্ষরণ পরীক্ষা করার জন্য যেসব অবদ্রব ব্যবহৃত হয় তাতে শুধু শ্লথগতিতে ভ্রমণশীল কণাগুলিই লক্ষ্য করা যায়, কিন্তু মহা-জাগতিক রশ্মির গবেষণায় প্রয়োজন হয় এমন সব অবদ্রব যেগুলিতে তীব্র গতিবেগসম্পন্ন হাল্কা কণার পথরেখার ছবি তুলতে পারা যায়। তাছাড়া অবদ্রবের আস্তরণ যথেষ্ট পুরু হওয়া দরকার যাতে একটি কণার সমগ্র গতিপথটিই এর ভিতর ধরা পড়তে পারে। 1940 সালের পর থেকে কোডাক, ইলফোর্ড ইত্যাদি কোম্পানীগুলি যাঁরা ফোটোগ্রাফীর অবদ্রব তৈরী ক'রে থাকেন, তাঁদের সহায়তায় মৌলিককণা ও মহাজাগতিক রশ্মির গবেষণার উপযোগী অবদ্রব তৈরী করার চেষ্টা হয়েছে। বিজ্ঞানী পাওয়েলের নেতৃত্বে

একটি বৈজ্ঞানিক কর্মীদল ইলফোর্ড কোম্পানীর সহযোগিতার একরকম নূতন ধরণের অবদ্রব উদ্ভাবন করেন যার ভিতর সিলভার ব্রোমাইডের ঘনত্ব সাধারণ ফোটোগ্রাফীর অবদ্রবের তুলনায় অনেক বেশী থাকে এবং এজন্য অপেক্ষাকৃত কম আয়নীকরণক্ষম কণার গবেষণায় বিশেষ উপযোগী। তাছাড়া একই সঙ্গে প্রায় 1 মিলিমিটার পুরু অবদ্রবের আস্তরণবিশিষ্ট ফোটোগ্রাফীর প্লেট ব্যবহার করাও সম্ভব হ'ল (সাধারণ ছবি তোলার জন্য ব্যবহৃত ফোটোগ্রাফীর প্লেটে অবদ্রবের আস্তরণ সাধারণতঃ 0·01 মিলিমিটার পুরু হয়)। মহাজাগতিক রশ্মির গবেষণার জন্য এইরকম বহুসংখ্যক প্লেট পাশাপাশি সাজিয়ে একটি তাড়া তৈরী করা হয় এবং সাধারণতঃ পাহাড়ের চূড়ায় বা খুব উচ্চস্থানে এদের রেখে আসা হয়। অনেক পরীক্ষাতে বেলুনের সাহায্যে ফোটোগ্রাফীর অবদ্রবের পাত বহুসহস্র ফুট উঁচুতে নিয়ে এগুলিকে মহাজাগতিক রশ্মিকণার সম্মুখীন করা হয়। এইসব নূতন ধরণের ফোটোগ্রাফীর প্লেট প্রতিভাত করার পদ্ধতিও অপেক্ষাকৃত জটিল, এদের ঠিকমত প্রতিভাত করতে পারলে তবেই কণাটির পথরেখার উপর রূপার দানার ঘনত্ব এর দ্বারা শক্তিক্ষয়ের সমানুপাতী হবে।

একটি কণার গতিপথে আয়নীভবনের ঘনত্ব এর গতিবেগের অপেক্ষক হিসাবে নিম্নলিখিত সূত্রের সাহায্যে প্রকাশ করা যায়

$$\left(-\frac{dE}{dx}\right)=Z^2c^4\ f(v) \qquad \cdots \qquad 12\cdot1$$

এখানে $f(v)$ কণাটির গতিবেগের একটি জটিল অপেক্ষক এবং Zc এর আধান। আয়নীভবনের ঘনত্ব কণাটির আধানের বর্গ এবং এর গতিবেগের উপর নির্ভরশীল, যেসমস্ত কণার আধান পরস্পর সমান তাদের ক্ষেত্রে সমগতিবেগবিশিষ্ট বিভিন্ন কণা সমপরিমাণ আয়নীভবন ঘনত্বের সৃষ্টি করবে। কণাটির ভ্রমণপথের মোট দৈর্ঘ্য বা এর দৌড়দূরত্ব নিম্নলিখিত সম্বন্ধের সাহায্যে প্রকাশিত

$$R=\int_0^R dx=\int_0^E\left(-\frac{dE}{dx}\right)^{-1}dE$$

12·1 সর্ত থেকে $\left(-\frac{dE}{dx}\right)$ এর পরিমাণ এই সম্বন্ধটিতে প্রয়োগ করলে আমরা পাই

$$R=\frac{1}{Z^2c^4}\int_0^E\frac{dE}{f(v)}=\frac{m}{Z^2c^4}\cdot F(v)$$

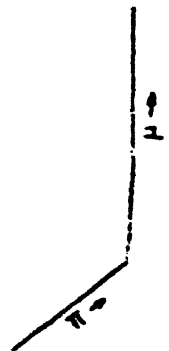
এখানে v ও E হ'ল যথাক্রমে কণাটির প্রাথমিক গতিবেগ ও শক্তি, এবং m এর ভর। তবে দৌড়দূরত্বকে আরও সাধারণভাবে নিম্নলিখিত উপায়ে লেখা হয়ে থাকে

$$R = \frac{m}{Z^2 e^4} F(v) + B \quad \cdots \quad 12{\cdot}2$$

এক্ষেত্রে $B = 0$ যখন $Z = 1$। B একটি শুদ্ধীকরণ রাশি, এটির উদ্ভব হয় কারণ যেসমস্ত কণার $Z > 1$ তারা তাদের ভ্রমণপথের শেষ প্রান্তে এসে ক্রমশঃ ইলেকট্রন আহরণ করতে থাকে এবং এর ফলে স্বাভাবিক আয়নীভবন সূত্রের কিছু পরিবর্তন প্রয়োজন হয়। $F(v)$ কণাটির গতিবেগের অপর একটি জটিল অপেক্ষক। যদি দুটি কণা এই সমান গতিবেগ নিয়ে চলতে শুরু করে তবে তাদের মোট পথদৈর্ঘ্যদ্বয়ের অনুপাত হবে

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{m_1}{m_2} \quad \cdots \quad 12{\cdot}3$$

এখানে উভয় কণার $Z = 1$ সমান ধরা হয়েছে, সুতরাং এথেকে কণাদের দৌড়দূরত্ব লক্ষ্য ক'রে এদের ভরের অনুপাত নির্ণয় করা যায়। উভয় পথরেখার ভিতর দানার ঘনত্ব যেখানে সমান সেখানে উপরোক্ত আলোচনা অনুসরণ ক'রে আমরা জানি যে কণা-দুটির গতিবেগও পরস্পর সমান। এই বিন্দু থেকে আরম্ভ ক'রে যেখানে কণার পথরেখা শেষ হয়েছে সেই বিন্দু পর্য্যন্ত পথদৈর্ঘ্যকে বলা হয় কণাটির বাকি দৌড়দূরত্ব। সমগতিবেগবিশিষ্ট বিন্দু থেকে আরম্ভ ক'রে বাকি দৌড়দূরত্ব পরিমাপ ক'রে এবং তাদের অনুপাত নিয়ে কণাদ্বয়ের ভরের অনুপাত মাপা হয় এবং এইভাবে প্রোটন কিংবা অন্য কোন জ্ঞাত কণার সঙ্গে তুলনা ক'রে অজ্ঞাত একটি কণার ভর মাপা যায়।

বিজ্ঞানী পাওয়েল (Powell) এবং তাঁর সহকর্মিবৃন্দ সর্ব্বপ্রথম ফোটোগ্রাফীর প্লেটের একটি তাড়া ব্যবহার ক'রে পাইমেসনের গতিপথের ছবি তুলতে সক্ষম হন। তাঁদের ছবিটির একটি প্রতিরূপ 12·10 চিত্রে দেখান হয়েছে। একটি মহাজাগতিক রশ্মিকণা অবদ্রবের ভিতর প্রবেশ করেছে এবং কিছুদূর যাবার পর এর ক্ষরণের ফলে নূতন একটি কণা সৃষ্টি হয়েছে। গতিপথের উপর আয়নীভবনের ঘনত্ব হঠাৎ যেভাবে পরিবর্ত্তিত হয়েছে তাথেকেই বোঝা যায় যে প্রাথমিক কণাটির ক্ষরণ ঘটেছে। কণা-দুটির গতিপথে আয়নীভবনের ঘনত্ব

চিত্র 12·10 পাওয়েল-এর পরীক্ষায় দৃষ্ট $\pi \rightarrow \mu$ ক্ষরণ।

ক্রমশঃ যেভাবে বৃদ্ধি পায় তা থেকে বোঝা যায় এরা কোন্ দিকে ভ্রমণ করছে এবং সমগতিবেগসম্পন্ন বিন্দুমূর্তি থেকে এদের বাকি দৌড়দূরত্ব পরিমাপ করলে এদের ভরের অনুপাত নির্দ্ধারণ করা সম্ভব, দেখা যায় যে প্রথম কণাটি (π) দ্বিতীয়টির (μ) তুলনায় কিছু ভারী। প্রোটনের পথরেখার সঙ্গে তুলনা করলে সিদ্ধান্ত করা সম্ভব যে দ্বিতীয় কণাটি একটি মিউমেসন, তারপর প্রথম ও দ্বিতীয়টির দৌড়দূরত্ব তুলনা ক'রে এদের ভরের অনুপাত নির্ণীত হয়। এরকম কয়েকটি ছবি পরীক্ষা ক'রে পাওয়েল সিদ্ধান্ত করলেন যে ফোটোগ্রাফীর প্লেটে একটি এপর্য্যন্ত অনাবিষ্কৃত নূতন কণার সন্ধান পাওয়া যাচ্ছে যার ক্ষরণের ফলে একটি মিউমেসন উৎপন্ন হচ্ছে। পাওয়েলের আবিষ্কৃত এই কণাটি পাইমেসন নামে অভিহিত হয়। পাওয়েল তাঁর প্রথম পরীক্ষায় যে অবদ্রব ব্যবহার করেছিলেন তা খুব বেশী স্পর্শকাতর ছিল না যার ফলে এর ভিতর শুধু পাই-মিউ ক্ষরণ লক্ষ্য করা সম্ভব হয়েছিল। কিন্তু অল্প কিছুদিন পরেই আরও অনেক বেশী স্পর্শকাতর ফোটোগ্রাফীর প্লেট সৃষ্টি করা সম্ভব হ'ল যাদের ভিতর একই সঙ্গে পাই এবং মিউ উভয়েরই ক্ষরণ লক্ষ্য করা গেল, অর্থাৎ একই সঙ্গে π, μ এবং e এই তিনরকম কণারই ছবি পাওয়া সম্ভব হ'ল। দেখা গেছে যে পাইমেসনের স্থির অবস্থায় ক্ষরণের ফলে যে মিউমেসন উৎপন্ন হয় তা সবসময়ই অনন্যশক্তিবিশিষ্ট, এর গতিশক্তি হয় 4·1 এমইভি, সুতরাং নবম অধ্যায়ের আলোচনা থেকে আমরা বুঝতে পারি যে π-μ ক্ষরণ হ'ল একটি দ্বিদেহ ক্ষরণ। ক্ষরণের ফলে যে অপর একটি আধানবিহীন কণা উৎপন্ন হয় এর কোনরকম পরিক্রিয়াই লক্ষ্য করা যায় না। এই কণাটি একটি নিউট্রিনো এবং π-μ ক্ষরণপ্রক্রিয়াটি নিম্নলিখিতভাবে উপস্থাপিত করা যায়

$$\pi^{\pm} \rightarrow \mu^{\pm} + \nu$$

বর্ত্তমানে পরীক্ষাগারে ত্বরণযন্ত্রের সাহায্যে ব্যাপকহারে পাইমেসন উৎপন্ন করা যায় এবং পাইমেসন সংক্রান্ত গবেষণা বর্ত্তমানে শুধু কৃত্রিম উপায়ে উৎপন্ন কণাদের সাহায্যেই করা হয়। এইভাবে এদের ভর এবং গড় জীবনকাল অত্যন্ত নির্ভুলভাবে মাপা সম্ভব হয়েছে। পাইমেসনের ভরের পরিমাণ হ'ল

$$M_{\pi^{\pm}} = 139.5 \text{ এমইভি}$$

পাইমেসন আবিষ্কার হবার পর এইটিই যে য়ুকাওয়া প্রস্তাবিত কণা সে-সম্বন্ধে বিজ্ঞানীরা নিঃসংশয় হলেন। পাইমেসন পরমাণু কেন্দ্রীনের সঙ্গে অত্যন্ত তীব্রভাবে ক্রিয়া করে এবং এই ক্রিয়া সহজেই লক্ষ্য করা যায়। য়ুকাওয়া প্রস্তাবিত কেন্দ্রীনের বলের প্রকৃতি থেকে জানা যায় যে একটি পাইমেসন যদি

কোন কেন্দ্রীনের ভিতর শোষিত হয় তাহলে কেন্দ্রীনটির ভিতর বিপুল পরিমাণে শক্তি সঞ্চারিত হবে এবং ফলে কেন্দ্রীনটির ভিতর একটি বিস্ফোরণের সৃষ্টি হয়ে এটির একাধিক অংশে বিভক্ত হয়ে যাবার সম্ভাবনা খুব বেশী। ফোটোগ্রাফীর প্লেটে এরকম বহুসংখ্যক ছবি পাওয়া গেছে যেখানে একটি পাইমেসন একটি কেন্দ্রীনের ভিতর শোষিত হবার পর এর ভিতর থেকে একাধিক কণা উৎপন্ন হয়ে অবদ্রবের ভিতর এদের গতিপথের ছাপ রেখে যাচ্ছে। মহাজাগতিক রশ্মির গবেষকদের ভাষায় এই ঘটনাটিকে বলা হয় একটি উচ্চশক্তিবিশিষ্ট "তারা"।

মহাজাগতিক রশ্মির উপর গবেষণায় π-মেসন এবং μ-মেসন ছাড়া আরও কয়েকপ্রকার কণা আবিষ্কৃত হয়েছে, এদের মধ্যে K-মেসন এবং রচেস্টার ও বাটলার আবিষ্কৃত Λ কণা উল্লেখযোগ্য। এইসব কণাও আজকাল পরীক্ষাগারে ত্বরণযন্ত্রের সাহায্যে কৃত্রিম উপায়ে উৎপন্ন হচ্ছে।

মহাজাগতিক রশ্মির উপর পৃথিবীর চৌম্বকক্ষেত্রের প্রভাব

যদিও সমস্ত দিক থেকে একই হারে মহাজাগতিক রশ্মির কণাগুলি পৃথিবীর উপর আপতিত হয় এমন প্রমাণ আছে কিন্তু পৃথিবীর কাছাকাছি আসার পর এর চৌম্বকক্ষেত্রের প্রভাবে অপেক্ষাকৃত স্বল্পশক্তিবিশিষ্ট কণাগুলি সহজেই বেঁকে যায়। কিছু কণা এই ক্ষেত্র ভেদ ক'রে পৃথিবীর বায়ুমণ্ডলে প্রবেশ করে, কিছু এই ক্ষেত্রের ভিতর আটকা পড়ে গিয়ে বিকিরণ বলয়ের সৃষ্টি করে, আবার কিছু কণা চৌম্বকক্ষেত্রের দ্বারা প্রতিফলিত হয়ে পৃথিবী থেকে দূরে চলে যায়। বহিরাগত আহিতকণার উপর পৃথিবীর চৌম্বকক্ষেত্রের ক্রিয়া অত্যন্ত জটিল এবং এখানে সেইসব তত্ত্ব আলোচনা করার কোন সুযোগ নেই, শুধু বিভিন্ন গবেষণালব্ধ কতগুলি ফলাফল অতি সংক্ষেপে বিবৃত করা যেতে পারে। যেসব কণা উত্তর ও দক্ষিণ চৌম্বকমেরুর উপর লম্বভাবে আপতিত হয় তাদের উপর চৌম্বক বিক্ষেপণী বলের পরিমাণ শূন্য, কারণ সেসব ক্ষেত্রে কণাটির গতিবেগ ও চৌম্বকক্ষেত্র পরস্পর সমান্তরাল থাকে।† এজন্য উত্তর ও দক্ষিণ মেরুতে খুব অল্পশক্তিসম্পন্ন আহিতকণাও বায়ুমণ্ডলে এসে পৌঁছুতে পারে এবং মহাজাগতিক রশ্মির ঘনত্ব স্বভাবতঃই এসব অঞ্চলে অনেক বেশী। যেসব

† উৎপন্ন বলের দিক নিম্নলিখিত ভেক্টর সমীকরণ দ্বারা প্রকাশ করা যায়:

$$F = \frac{\vec{v} \times \vec{B}}{c}$$

কণা নিরক্ষরেখার উপর লম্বভাবে প্রবেশ করে তাদের উপর চৌম্বক বিক্ষেপণী বলের প্রভাব সবচেয়ে বেশী, আগন্তুক কণাগুলি যদি ধন-আহিত হয় তবে চৌম্বক বলের প্রভাবে এরা পূর্ব্ব দিকে বিক্ষিপ্ত হবে, অর্থাৎ মনে হবে যে পশ্চিম আকাশ থেকে আগত কণার সংখ্যা পূর্ব্ব আকাশ থেকে আগত কণার তুলনায় বেশী। আগন্তুক কণাগুলি ঋণ-আহিত হলে ফলাফল হবে ঠিক বিপরীত। একে বলা হয় পূর্ব্ব-পশ্চিম প্রক্রিয়া, পরীক্ষার দ্বারা এই প্রক্রিয়া লক্ষ্য করা সম্ভব হয়েছে।

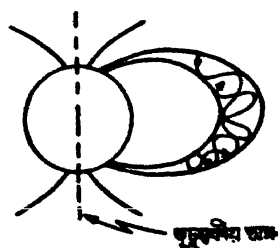
যে আয়োজনের দ্বারা পূর্ব্ব-পশ্চিম প্রক্রিয়া অনুসন্ধান করা হয় তাকে বলা হয় গণনকার দূরবীক্ষণ। আয়োজনটি খুবই সহজ (চিত্র 12·11), একটি দীর্ঘ ঋজু দণ্ডের দুপাশে দুটি গাইগার-মূলার গণনকার বেঁধে দিয়ে যদি এদের তাৎক্ষণিকতা বর্ত্তনীর দ্বারা যুক্ত করা যায় তবেই একটি গণনকার দূরবীক্ষণ তৈরী হবে। এর ফলে গণনকারদ্বয়ের দিকে একটি সরু শঙ্কু-আকৃতি অঞ্চলের মধ্যে যেসব কণা আপতিত হয় সেগুলিই শুধু বর্ত্তনীর ভিতর ধরা পড়ে, অর্থাৎ শুধু একটি নির্দ্দিষ্ট দিক থেকে আগত কণাগুলিই এই আয়োজনটির দ্বারা দৃষ্ট হয়। দণ্ডটি ঘুরিয়ে ফিরিয়ে এই দূরবীক্ষণটি আকাশের দিকে বিভিন্ন নির্দ্দিষ্ট কোণে নত করান যায় এবং ঐসব দিক থেকে আগত মহাজাগতিক রশ্মির ঘনত্ব পরীক্ষা করা হয়। পূর্ব্ব-পশ্চিম প্রক্রিয়া লক্ষ্য করার জন্য অধিক উচ্চতায় পরীক্ষা করা দরকার, ছয় থেকে দশ হাজার ফুট উচ্চতায় যেসব পরীক্ষা করা হয়েছে তাতে পূর্ব্ব-পশ্চিম প্রক্রিয়া লক্ষ্য করা সম্ভব হয়েছে, দেখা গেছে যে পশ্চিম আকাশ থেকে আগত কণার সংখ্যাই অপেক্ষাকৃত বেশী। প্রায় সাড়ে সাত হাজার ফুট উঁচুতে একটি পরীক্ষায় ক্ষিতিজের সঙ্গে গণনকার দূরবীক্ষণটিকে 45° কোণে রেখে রোসি লক্ষ্য করেন যে পূর্ব্ব আকাশের তুলনায় পশ্চিম আকাশ থেকে আগত কণার ঘনত্ব প্রায় শতকরা 26 ভাগ বেশী, এথেকে বোঝা যায় যে মহাজাগতিক রশ্মির প্রাথমিক কণাগুলি মূলতঃ ধন-আধানবিশিষ্ট। শুধু প্রাথমিক কণাদের উপরই পূর্ব্ব-পশ্চিম প্রক্রিয়া আশা করা যায়, কণাগুলি যখন বায়ুমণ্ডলে প্রবেশ করে তখন এরা বিভিন্ন প্রক্রিয়ার দ্বারা বিভিন্ন দিকে আরও অনেক আহিতকণা উৎপন্ন করে, সুতরাং সে-অবস্থায় বিভিন্ন দিক থেকে আগত মহাজাগতিক রশ্মির ঘনত্ব সমান মনে হবে। কিন্তু মাত্র যে সাত হাজার ফুট উঁচুতে পূর্ব্ব-পশ্চিম প্রক্রিয়া দৃষ্ট হয় তাথেকে

চিত্র 12·11
গণনকার দূরবীক্ষণ আয়োজন।

প্রমাণ হয় প্রাথমিক কণাগুলির গতিপথের দিকের সঙ্গে এদের দ্বারা উৎপন্ন কণাগুলির গতিপথের দিকের যথেষ্ট পারস্পরিকতা রয়েছে, অর্থাৎ উৎপন্ন কণাগুলিও প্রাথমিক কণার গতিপথের দিকেই অগ্রসর হয়। পরে বেলুনের সাহায্যে বায়ুমণ্ডলের আরও অনেক ঊর্দ্ধে পরীক্ষা চালিয়েও পূর্ব্ব-পশ্চিম প্রক্রিয়া লক্ষ্য করা সম্ভব হয়েছে।

জটিল গণনার সাহায্যে দেখান সম্ভব যে, অপেক্ষাকৃত স্বল্পশক্তিসম্পন্ন কণাগুলির ক্ষেত্রে পৃথিবীপৃষ্ঠে প্রত্যেক অক্ষাংশের জন্য ভূপৃষ্ঠ ও আকাশের মধ্যে এক শঙ্কু-আকৃতির অঞ্চল আছে যার ভিতর দিয়ে ঐসব আহিত কণা পৃথিবীতে প্রবেশ করতে পারে না, আগন্তুক কণার শক্তি যত কম হয় তত এই নিষিদ্ধ অঞ্চলের বিস্তার বৃদ্ধি পেতে থাকে, অবশেষে কোন এক শক্তিতে এসে আকাশের সমস্ত দিকই নিষিদ্ধ অঞ্চলে পরিণত হয়, অর্থাৎ এক ন্যূনতম শক্তির কম শক্তিবিশিষ্ট কণা সেই অক্ষাংশে আদৌ প্রবেশ করতে পারে না। কোন নির্দিষ্ট অক্ষরেখার উপর ধন-আহিত কণার জন্য এই শঙ্কুর দিক হয় পূর্ব্বদিক বরাবর, ঋণ-আহিত কণার জন্য পশ্চিমদিক বরাবর। ন্যূনতম শক্তির পরিমাণ সবচেয়ে বেশী হবে নিরক্ষরেখার উপর এবং উত্তর ও দক্ষিণ চৌম্বকমেরুতে ঐ পরিমাণ হবে শূন্য। গণনার সাহায্যে দেখান যায় যে 14 বিইভির কম শক্তিসম্পন্ন প্রোটন কিংবা 11 বিইভির কম শক্তিসম্পন্ন আলফাকণা নিরক্ষরেখার উপর পৌঁছুতে পারবে না।

পৃথিবীর চৌম্বকক্ষেত্রের প্রভাবে যে বিকিরণ বলয় সৃষ্টি হয় তা 12·12 চিত্রে দেখা যাচ্ছে, একটি আহিত আগন্তুক কণা কিভাবে পৃথিবীর চৌম্বকক্ষেত্রের ভিতর আটকা পড়তে পারে তা বোঝান হয়েছে। এইসব কণাগুলি অপেক্ষাকৃত কম শক্তি-সম্পন্ন এবং এদের অধিকাংশই সূর্য্যের ভিতর থেকে নির্গত হয়ে আসে। পৃথিবীর চৌম্বকক্ষেত্রে প্রবেশের পর এদের গতিপথ অনবরত বেঁকে যেতে থাকে যার জন্য এরা পৃথিবীপৃষ্ঠে পৌঁছুতে পারে না, আবার চৌম্বকক্ষেত্রের প্রভাব থেকেও মুক্ত হতে পারে না। এইভাবে অনির্দ্দিষ্ট কাল এরা চৌম্বকক্ষেত্রের ভিতর আবদ্ধ অবস্থায় অবস্থান করে এবং পৃথিবীর চারপাশে একটি শক্তিশালী আহিত কণা সমন্বিত বিকিরণ বলয়ের সৃষ্টি করে। স্বভাবতঃই নিরক্ষরেখার উপর বিকিরণ বলয়ের প্রসার সর্ব্বাধিক এবং চৌম্বক-

চিত্র 12·12
বিকিরণ বলয়ের ভিতর বদ্ধ আহিতকণার গতি।

মেরুঅঞ্চলের উপর বিকিরণ বলয় সৃষ্টি হয় না। আবিষ্কারকের নামানুসারে এই বিকিরণ বলয়গুলি 'ভ্যান এ্যালেন (Van Allen) বিকিরণ বলয়' নামে সুপ্রসিদ্ধ।

মহাজাগতিক রশ্মির পশলা (Cosmic ray shower)

একটি তীব্র শক্তিশালী প্রাথমিক কণা বায়ুমণ্ডলের কেন্দ্রীনগুলির সঙ্গে ক্রিয়া ক'রে বহুসংখ্যক আহিতকণা এবং আলোককণার জন্ম দিতে পারে। উদাহরণস্বরূপ, একটি অত্যধিক শক্তিশালী প্রোটন কেন্দ্রীনের সঙ্গে ক্রিয়া ক'রে একাধিক শক্তিশালী পাইমেসন সৃষ্টি করতে পারে। এই পাইমেসনগুলি থেকে মিউমেসন এবং তাথেকে শক্তিশালী ইলেকট্রন অথবা পজিট্রনের সৃষ্টি হয়। যথেষ্ট শক্তিশালী হলে এইসব ইলেকট্রন ও পজিট্রন পুনরায় ত্বরণ-বিকিরণ, আয়নীভবন, জোড়াবিনাশ প্রভৃতি প্রক্রিয়ার দ্বারা ইলেকট্রন ও গামারশ্মি সৃষ্টি করে এবং গামারশ্মির আলোককণাগুলি পুনরায় ইলেকট্রন-পজিট্রন জোড়া উৎপন্ন করতে পারে। প্রক্রিয়াগুলি ক্রমাগত চলতে থাকে যতক্ষণ না পর্যন্ত নূতন নূতন উৎপন্ন ইলেকট্রন ও আলোককণার শক্তি এত কমে যায় যে এরা আর পুনরায় ঐসব প্রক্রিয়াগুলিতে অংশগ্রহণ করতে পারে না। এইসব উৎপন্ন কণা ও গামারশ্মিগুলি ক্রমশঃ সম্মুখের দিকে ছড়িয়ে পড়তে থাকে এবং অবশেষে এক বিস্তৃত অঞ্চল জুড়ে আহিতকণা ও গামারশ্মির বর্ষণ হয়। এইভাবে একটি শক্তিশালী কণা থেকে বহুসংখ্যক নূতন নূতন আহিতকণা ও আলোককণা উৎপন্ন হওয়ার প্রক্রিয়াটিকে বলা হয় মহাজাগতিক রশ্মির পশলা। 12.12 চিত্রে মহাজাগতিক রশ্মির পশলা কিভাবে উৎপন্ন হয় তা দেখান হয়েছে, এখানে পশলাটি সৃষ্টি হচ্ছে একটি ইলেকট্রনের দ্বারা, সোজা রেখাগুলি ইলেকট্রন অথবা পজিট্রনকে নির্দেশ করে এবং তরঙ্গিত রেখাগুলি আলোককণাকে নির্দেশ করে। পশলাটি শুধু ইলেকট্রন, পজিট্রন এবং আলোককণার দ্বারা গঠিত। শুধুমাত্র শক্তিশালী তীব্র অন্তর্গমনক্ষম কণাসমন্বিত পশলাও লক্ষ্য করা সম্ভব হয়েছে, ঐসব পশলাগুলি মূলতঃ পাই এবং মিউ মেসনের দ্বারা গঠিত। প্রাথমিক কণাটির দ্বারা সৃষ্ট একটি পাইমেসন পুনরায় আবার একটি কেন্দ্রীনের সঙ্গে সংঘর্ষে একাধিক শক্তিশালী পাইমেসন উৎপন্ন করতে পারে, এই প্রক্রিয়া

চিত্র 12.13 একটি ইলেকট্রনের দ্বারা সৃষ্ট মহাজাগতিক রশ্মির পশলা।

ক্রমাগত চলতে থাকলে অবশেষে একটি তীব্র অন্তর্গমনক্ষম পশলার সৃষ্টি হয়। যেকোন মাধ্যমের ভিতর একটি পশলা গড়ে উঠতে পারে, স্বভাবতঃই বাতাসের ভিতর যদি একটি পশলা সৃষ্টি হয় তবে তা অপেক্ষাকৃত বিরাট আকারের হবে, কিন্তু সীসার ভিতর গড়ে ওঠা পশলার প্রসার হবে অনেক কম। একটি মেঘকক্ষের ভিতর সারি সারি সীসার পাত বসিয়ে তাদের ভিতর স্বল্পপরিসরের মধ্যে গড়ে ওঠা পশলার ছবি তোলা সম্ভব হয়েছে, এরকম তোলা ছবির মধ্যে অনেকক্ষেত্রেই 200 বা 300 সংখ্যক বিভিন্ন উৎপন্ন কণার পথরেখা গণনা করতে পারা যায়।

বায়ুমণ্ডলীয় পশলা লক্ষ্য করার উপযোগী একটি গণনকারের আয়োজন 12·14 চিত্রে দেখান হয়েছে, পরীক্ষাটি প্রথম করেন ওজে (Auger)। তিনটি গণনকারের মধ্যে G_1 ও G_2 গণনকারদ্বয় পরস্পরের উপরে ও নীচে এবং তৃতীয় গণনকারটি পাশের দিকে নির্দিষ্ট দূরত্বে বসান আছে। তিনটি গণনকারই পরস্পরের সঙ্গে তাৎক্ষণিকতা আয়োজনে যুক্ত, তিনটি গণনকারের মধ্যে যদি একই সঙ্গে ব্যত্যয়ের সৃষ্টি হয় তবে তাতে প্রতিপন্ন হবে যে গণনকারগুলির নিকটবর্তী অঞ্চলে মহাজাগতিক রশ্মির একটি পশলা ঘটছে। G_1 ও G_2 ও গণনকারদ্বয়ের ভিতর ধ্রুব দূরত্ব 22 সেণ্টিমিটার রেখে G_3 গণনকারটির দূরত্ব আনুভূমিকভাবে ক্রমশঃ বাড়িয়ে যাওয়া হয় এবং সাথে সাথে ঘণ্টাপ্রতি কতগুলি তাৎক্ষণিক ঘটনা ঘটছে তা লক্ষ্য করা হয়। দেখা গেছে যে G_3 এর দূরত্ব বৃদ্ধির সাথে সাথে তাৎক্ষণিক ঘটনার সংখ্যা ক্রমশঃ কমতে থাকে কিন্তু এর সর্বাধিক দূরত্ব বাড়িয়ে 75 মিটার করলেও আয়োজনটির মধ্যে কিছু কিছু তাৎক্ষণিক ঘটনা ধরা পড়তে থাকে, এথেকে প্রতীয়মান হয় যে কিছু কিছু বাতাসের পশলা বিস্তৃত অঞ্চল জুড়ে ঘটে।

G_1

G_3

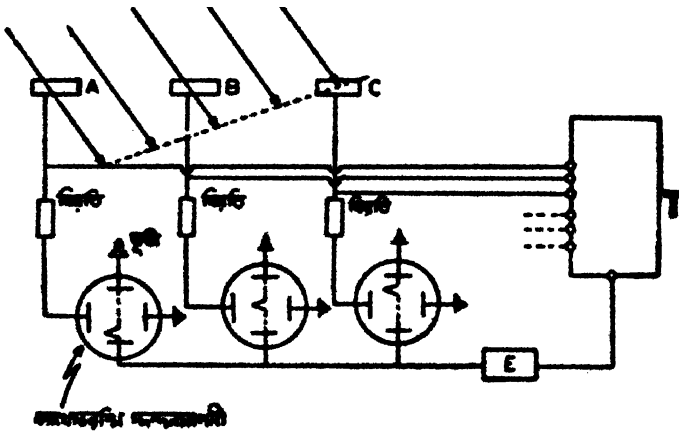
G_2

চিত্র 12·14

পশলা কিভাবে ঘটে তা নিয়ে অত্যন্ত বিস্তৃত তাত্ত্বিক ও পরীক্ষামূলক গবেষণা হয়েছে। নানা পরীক্ষায় দেখা গেছে যে, পশলার ভিতর উৎপন্ন কণাগুলি প্রাথমিক পশলা সৃষ্টিকারী কণাটি যেদিকে অগ্রসর হচ্ছিল গড়ে মোটামুটি সেই দিক অনুসরণ ক'রেই অগ্রসর হয়, তবে অগ্রসর হবার সময় উৎপন্ন কণাগুলি ধীরে ধীরে তির্যকভাবে ছড়িয়ে পড়তে থাকে। পশলার ভিতর উৎপন্ন কণার ঘনত্ব সর্বত্র সমান নয়, প্রাথমিক কণাটি যে বিন্দুতে এসে উপস্থিত হ'ত সেই বিন্দুতে উৎপন্ন কণার ঘনত্ব সর্বাধিক থাকে এবং তাথেকে তির্যকভাবে যতই দূরে সরে যাওয়া যায় ততই কণার ঘনত্ব ক্রমশঃ হ্রাস পায়।

অত্যধিক শক্তিশালী প্রাথমিক কণার দ্বারা সৃষ্ট বায়ুমণ্ডলীর পশলার কেন্দ্রবিন্দু থেকে কয়েকশ' মিটার দূরেও উৎপন্ন কণাদের যথেষ্ট ঘনত্ব লক্ষ্য করা যায়। মোট যে অঞ্চল জুড়ে পশলাটি ঘটছে তার আয়তন জানা থাকলে তাথেকে পশলা সৃষ্টিকারী প্রাথমিক কণাটির শক্তি সম্বন্ধে অবহিত হওয়া যায়।

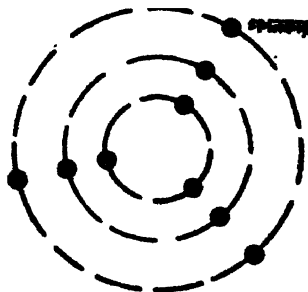
অতিকায় বায়ুর পশলা (Gigantic air shower)

বর্তমানেও পশলা সম্বন্ধে অনেকরকম গবেষণা চলেছে, অস্বাভাবিক বেশী শক্তিসম্পন্ন মহাজাগতিক রশ্মিকণাগুলির শক্তি পরিমাপ করার জন্য এদের দ্বারা সৃষ্ট পশলার উপর পরীক্ষা করাই একমাত্র উপায়। 12·15 চিত্রে অতিকায় বায়ুমণ্ডলীর পশলা লক্ষ্য করার জন্য ব্যবহৃত একটি ইলেকট্রনিক বর্তনীর আয়োজন দেখান হয়েছে। A, B, C,······ ইত্যাদি হ'ল একাধিক চমক গণনকার যাদের ভিতর পশলার কণাগুলি বিভব ব্যত্যয়ের সৃষ্টি করে। এগুলি

চিত্র 12·15

অতিকায় বায়ুমণ্ডলীর পশলা পর্যবেক্ষণের জন্য রোসি এবং সহকর্মিবৃন্দ ব্যবহৃত বৈদ্যুতিক বর্তনী।

বহু দূরে দূরে সাজান থাকে। এই গণনকারগুলির প্রত্যেকটিই একটি ক'রে ক্যাথোডরশ্মি স্পন্দনমাপনীর সঙ্গে যুক্ত, এই স্পন্দনমাপনীগুলির ভিতর বিভব ব্যত্যয়গুলি দৃষ্ট হয়। ক্যাথোডরশ্মি স্পন্দনমাপনীর ভিতর ইলেকট্রনের ধারা একটি নির্দিষ্ট দিকে সরলরেখায় চলতে থাকে, গণনকারের ভিতর একটি ব্যত্যয় সৃষ্টি হলে তা এই প্রবাহধারাকে লম্বভাবে বিচ্যুত করে, এই বিচ্যুতির বিস্তার এবং অবস্থান স্পন্দনমাপনীর পর্দায় লক্ষ্য করা যায়। ক্যাথোডরশ্মি

স্পন্দনমাপনীগুলি পাশাপাশি সাজান থাকে এবং একই সঙ্গে এদের প্রত্যেকের একত্রে ছবি তোলার ব্যবস্থা থাকে, বিভিন্ন স্পন্দনমাপনীর পর্দার ভিতর ব্যত্যয়ের অবস্থান লক্ষ্য ক'রে ঠিক কোন্ সময়ে কোন্ গণনকারটিতে ব্যত্যয়ের সৃষ্টি হচ্ছে তা জানা যায় এবং তাথেকে সমগ্র পশলাটি কোন্ দিকে অগ্রসর হচ্ছে তা বোঝা যায়। বিভব ব্যত্যয়টির বিস্তার অর্থাৎ লম্বভাবে ইলেকট্রনের ধারাটির যতটা বিচ্যুতি হয় তা দেখে বোঝা যায় ঐ বিশেষ গণনকারটির ভিতর কতগুলি কণা এসে আঘাত করছে। 12·15 চিত্র থেকে দেখা যাচ্ছে যে, সর্ব্বপ্রথম A, পরে B এবং তারপরে C ইত্যাদি গণনকারের ভিতর ব্যত্যয় সৃষ্টি হচ্ছে, এথেকে বোঝা যায় যে, সমগ্র পশলাটি বাঁদিক থেকে ডানদিকে নির্দ্দিষ্ট কোণে অগ্রসর হচ্ছে। বলা বাহুল্য যে প্রতিক্ষেত্রেই গণনকার থেকে স্পন্দনমাপনী পর্য্যন্ত বৈদ্যুতিক পথের দূরত্ব সমান হতে হবে, সমান না হলে কোঅ্যাক্সিয়াল তারের মাধ্যমে কৃত্রিম উপায়ে বিরতি সৃষ্টি ক'রে এই দূরত্ব সমান করা হয়। প্রত্যেকটি গণনকারই একটি তাৎক্ষণিকতা আয়োজন T-এর দ্বারা পরস্পরের সঙ্গে যুক্ত, আয়োজনটি এইরকম যে তিন বা ততোধিক গণনকারের ভিতর তাৎক্ষণিক ব্যত্যয়ের সৃষ্টি হলে T বর্ত্তনীর ভিতর থেকে একটি সঙ্কেত উৎপন্ন হয়ে এসে একটি ইলেকট্রনিক সুইচ E-এর মাধ্যমে প্রত্যেকটি ক্যাথোডরশ্মি স্পন্দনমাপনীকে একই সঙ্গে ক্রিয়াশীল ক'রে তোলে, অর্থাৎ এদের মধ্যে একই সঙ্গে ইলেকট্রন ধারার ভ্রমণ আরম্ভ হয়।

এই ধরণের বিরাট আকারের বায়ুর পশলা পর্য্যবেক্ষণ করার জন্য গণনকারের আয়োজন কিরকম হতে পারে তার উদাহরণ 12·16 চিত্রে দেখান

চিত্র 12·16

হয়েছে, এখানে কতগুলি অভিন্ন কেন্দ্রবিশিষ্ট বৃত্তের পরিধির উপর গণনকারগুলি সাজান আছে। সবচেয়ে বাইরের বৃত্তটির ব্যাসার্দ্ধ এক কিলোমিটারেরও বেশী হতে পারে। কোন কোন বৃত্তগুলি পশলার মধ্যে আছে তা লক্ষ্য ক'রে

পশলাটির আয়তন নির্ধারণ করা যায় এবং বিভিন্ন ব্যত্যয়গুলির বিস্তারের পরিমাণ থেকে পশলা সৃষ্টিকারী প্রাথমিক কণাটির মোট শক্তিও মাপা যায়। 10^{16} ইভির অধিক শক্তিশালী কণার শক্তি পরিমাপ করার জন্য এই পদ্ধতিই হ'ল একমাত্র উপায়। সর্বাধিক যে শক্তি এভাবে মাপা সম্ভব হয়েছে তা হ'ল 5×10^{19} ইভি, এর সঙ্গে তুলনীয় পরীক্ষাগারে এপর্যন্ত উৎপন্ন সর্বাধিক শক্তিসম্পন্ন কণার শক্তি বা প্রায় 2×10^{11} ইভি। যেহেতু এত অধিক শক্তিসম্পন্ন কণার পরীক্ষাগারে উৎপাদন দূর-ভবিষ্যতেও সম্ভব হবে ব'লে মনে হয় না, মহাজাগতিক রশ্মির গবেষণা এইসব কণার প্রকৃতি সম্বন্ধে জ্ঞানলাভের উপায় হিসাবে বর্তমানে বিজ্ঞানীদের নিকট খুবই ফলপ্রসূ। এইসব পরীক্ষাতে পশলাটি বায়ুমণ্ডলের ভিতর দিয়ে যে কোণে অগ্রসর হতে থাকে তা লক্ষ্য ক'রে পশলাসৃষ্টিকারী কণাটি আকাশের কোন্ কোণ থেকে আসছে তা জানা যায়, কারণ পশলাটি প্রাথমিক কণার গতিপথের দিকেই অগ্রসর হয়।

মহাজাগতিক রশ্মির উৎস

বায়ুমণ্ডলের বহু ঊর্ধ্বে, প্রায় 60,000 ফুট উঁচুতে বেলুনের সাহায্যে পরীক্ষা চালিয়ে ফোটোগ্রাফীয় অবদ্রবের ভিতর মহাজাগতিক রশ্মির প্রাথমিক কণাগুলির পথরেখা লক্ষ্য করা সম্ভব হয়েছে, রকেট এবং কৃত্রিম উপগ্রহের সাহায্যে আরও উঁচুতে এসব পরীক্ষা বহুবার করা হয়েছে। এই পরীক্ষাগুলি থেকে প্রমাণিত হয় যে প্রাথমিক কণাগুলির অধিকাংশই হ'ল প্রোটন এবং কিছু কিছু হাল্কা কেন্দ্রীন, তবে $Z=40$ বা তারও অধিক পারমাণবিক সংখ্যা-বিশিষ্ট কিছু কেন্দ্রীনও এই কণাগুলির ভিতর লক্ষিত হয়েছে। বিজ্ঞানীরা বহুদিন থেকেই এই শক্তিশালী আগন্তুক কণাগুলির উৎস সম্বন্ধে চিন্তা করেছেন, যদিও এই সমস্যার সঠিক সমাধান সম্ভব হয়েছে এমন বলা যায় না। আসলে সমস্যা হ'ল কিভাবে কণাগুলি এত অধিক শক্তি অর্জন করে। প্রথমে মনে করা হয়েছিল যে সূর্যই যাবতীয় মহাজাগতিক রশ্মির উৎস, সূর্যের ভিতর মাঝে মাঝে প্রচণ্ড আলোড়নের সৃষ্টি হয় এবং এর ফলে শক্তিশালী কণা নির্গত হয়ে থাকে। সূর্যের গায়ে মাঝে মাঝে যে কালো দাগ দেখা যায় সেগুলি হ'ল আসলে কতগুলি বিশাল আকৃতির স্বল্প তাপমাত্রাবিশিষ্ট অঞ্চল, এগুলির ভিতর চৌম্বকক্ষেত্রের অস্তিত্ব থাকে যার দ্বারা আহিত কণার পক্ষে ত্বরিত হওয়া সম্ভব। কিন্তু নানা কারণে সূর্যই যে একমাত্র উৎস এ ধারণা পরিত্যাগ করতে হয়েছে। প্রথম কারণ হ'ল এই যে, মহাজাগতিক রশ্মির তীব্রতার কোন দিবারাত্রির ব্যতিক্রম লক্ষ্য করা যায় না, সূর্যই যদি উৎস হয় তবে এই ধরনের

ব্যতিক্রম আশা করা যায়। তাছাড়া এমন কোন প্রক্রিয়া জানা নেই যার দ্বারা পর্দা সৃষ্টিকারী অস্বাভাবিক শক্তিশালী কণাগুলি সূর্য্যের ভিতর থেকে উৎপন্ন হতে পারে।

সূর্য্য ছাড়া অন্য কোন নক্ষত্রের ভিতরেও মহাজাগতিক রশ্মির কণাগুলি উৎপন্ন হতে পারে, বিশেষতঃ বিস্ফোরণশীল নক্ষত্র বা নোভার ভিতর থেকে অত্যন্ত শক্তিশালী কণা উৎক্ষিপ্ত হবার সম্ভাবনা খুব বেশী। বর্ত্তমানে বিজ্ঞানীদের অনুমান হ'ল যে আমাদের ছায়াপথই মহাজাগতিক রশ্মি সৃষ্টির জন্য দায়ী। কণাগুলি কিভাবে শক্তি অর্জ্জন করে তার একটি সুন্দর ক্রিয়াকল্পের উদাহরণ দিয়েছেন বিজ্ঞানী ফের্মি। এঁর মতে ছায়াপথের ভিতর শূন্য অঞ্চলে খুব সামান্য ঘনত্ব সমন্বিত আয়নিত গ্যাসের মেঘ আছে এবং এই মেঘের ভিতর চৌম্বকক্ষেত্রের অস্তিত্ব আছে। এই ক্ষেত্রের তীব্রতা অবশ্য খুবই সামান্য, গড়ে এর পরিমাণ হবে প্রায় 10^{-6} গস এবং ছায়াপথের বিভিন্ন অঞ্চলে এই চৌম্বকক্ষেত্রের তীব্রতা এবং এর দিক সম্পূর্ণ অনির্দ্দেশিতভাবে বিতরিত থাকে। একটি আহিত কণা যখন এরকম একটি চৌম্বকক্ষেত্র সমন্বিত অঞ্চল অতিক্রম করে তখন ক্ষেত্রের সঙ্গে পরিক্রিয়ার ফলে কণাটির শক্তির ক্ষয় বা বৃদ্ধি ঘটতে পারে। ফের্মি গণনা ক'রে দেখিয়েছেন যে গড়ে একটি কণা চৌম্বক-ক্ষেত্রের সঙ্গে প্রতি সংঘর্ষপিছু কিছু শক্তি অর্জ্জন করবে, এভাবে বহুবার সংঘর্ষের ফলে শক্তি বৃদ্ধি পেতে পেতে অবশেষে এর শক্তি মহাজাগতিক রশ্মির ভিতর দৃষ্ট শক্তির পর্য্যায়ে উপনীত হবে। চৌম্বকক্ষেত্র অতিক্রমণের সময় কণাটির দিক পরিবর্ত্তন ঘটে এবং পরপর বিভিন্ন চৌম্বকক্ষেত্র সমন্বিত অঞ্চল অতিক্রম করার ফলে কণাটির গতিপথের দিক সম্পূর্ণ অনির্দ্দেশিত হয়ে পড়ে। এই ক্রিয়াকল্প থেকে আশা করা যায় যে ছায়াপথের ভিতর ইতস্ততঃ ভ্রমণশীল অত্যুচ্চ শক্তিবিশিষ্ট মহাজাগতিক রশ্মিকণার একটি নির্দ্দিষ্ট ঘনত্ব আছে অর্থাৎ মহাজাগতিক রশ্মিও ছায়াপথের একটি উপাদান। তবে এই ধরণের ক্রিয়াকল্পের সাহায্যেও 10^{18} ইভি কিংবা তারও বেশী শক্তিশালী কণাদের অস্তিত্ব ভালোভাবে ব্যাখ্যা করা যায় না, বর্ত্তমান ধারণা এই যে এরা অতিদূরে কোন ভিন্ন ছায়াপথ থেকে আসে, একাধিক ছায়াপথের ভিতর দিয়ে অগ্রসর হবার সময় এদের শক্তি ক্রমশঃ বৃদ্ধি পেয়ে পেয়ে অবশেষে এই অতিকায় শক্তিতে পরিণত হয়।

মৌলিক কণাসমূহ (Elementary particles)

বিভিন্ন মৌলিক কণার আবিষ্কার আধুনিক বিজ্ঞানে এক অত্যন্ত তাৎপর্য্যপূর্ণ ঘটনা। দুএকটি কণার নিদর্শন আমরা দিয়েছি, এরা হ'ল পাই ও

মিউমেসন এবং পজিট্রন, এছাড়া অবশ্য ইলেকট্রন, প্রোটন এবং নিউট্রনও মৌলিক কণাসমূহের অন্তর্গত। পরবর্তী কালে কৃত্রিম উপায়ে এরকম আরও বহু কণা আবিষ্কৃত হয়েছে এবং এদের গঠন ও ধর্মাবলীর উপর পরীক্ষা-নিরীক্ষা আধুনিক বিজ্ঞানের এক অত্যন্ত সম্ভাবনাবহুল শাখায় পরিণত হয়েছে। এদের উপর বর্তমানে যে ব্যাপক গবেষণা চলছে তার এক অতিক্ষুদ্র অংশের বিবরণ দেবার সুযোগও এখানে নেই, আমরা শুধু এখানে অতি সংক্ষেপে এরকম কতগুলি কণার পরিচিতি দেবার চেষ্টা করব। একমাত্র প্রোটন, নিউট্রন এবং ইলেকট্রন ছাড়া আর কোন পদার্থকণাকেই স্থায়িভাবে প্রকৃতির ভিতর অবস্থান করতে দেখা যায় না, শুধু তীব্র শক্তির কতগুলি বিক্রিয়ার মাধ্যমেই এইসব কণা উৎপন্ন হয়ে থাকে, এজন্যই মহাজাগতিক রশ্মির ভিতর এইসব কণার সন্ধান পাওয়া যায়। বর্তমানে ত্বরণযন্ত্রের সাহায্যে কৃত্রিম উপায়ে এই কণাগুলি উৎপন্ন করা হয়।

পাইমেসন

1948 খ্রীষ্টাব্দে গার্ডনার এবং ল্যাটেস্ সর্বপ্রথম পাইমেসন কৃত্রিম উপায়ে উৎপন্ন করতে সক্ষম হন। নানারকম বিক্রিয়ায় পাইমেসন উৎপন্ন হতে পারে, এদের মধ্যে নিম্নলিখিত বিক্রিয়াগুলি উল্লেখ করা যায়

$$p+p \rightarrow p+n+\pi^{+}$$

$$p+n \rightarrow p+p+\pi^{-}$$

$$p+n \rightarrow n+n+\pi^{+}$$

$$p+p \rightarrow p+p+\pi^{+}+\pi^{-}, \text{ইত্যাদি}$$

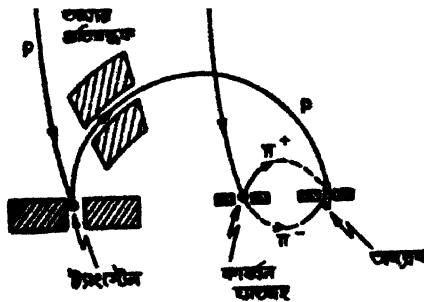
কৃত্রিমভাবে পাইমেসন সর্বপ্রথম উৎপন্ন করা হয় বার্কলি অনুসৃত চক্রত্বরকের সাহায্যে উৎপন্ন 345 এমইভি প্রোটন প্রবাহের দ্বারা একটি কার্বন ঘাতবহকে আঘাত ক'রে, আপতিত প্রোটনটি কেন্দ্রীনের অভ্যন্তরস্থ একটি প্রোটন বা একটি নিউট্রনের সঙ্গে পারিক্রিয়া ঘটিয়ে উপরিলিখিত বিক্রিয়াগুলির জন্ম দেয়। ঐ ত্বরণযন্ত্রে ত্বরিত 380 এমইভি আলফাকণার দ্বারাও পাইমেসন উৎপন্ন করা হয়েছে। এভাবে মহাজাগতিক রশ্মির ভিতর দৃষ্ট সংখ্যার তুলনায় অনেক অধিক সংখ্যায় পাইমেসন উৎপন্ন করা সম্ভব হয়েছে। কৃত্রিম উপায়ে উৎপন্ন পাইমেসনগুলিকে ফোটোগ্রাফীয় অবদ্রব, মেঘকক্ষ কিংবা বুদ্বুদকক্ষের ভিতর পরীক্ষা ক'রে এদের ভর, ক্ষয়ণের ধরণ ও বিক্রিয়া পদ্ধতি সম্বন্ধে

অনুসন্ধান করা যায়। এক একটি মৌলিক কণার একাধিক ক্ষয়ণের ধরণ লক্ষ্য করা যায়, পাইমেসনের ক্ষয়ণের ধরণ প্রধানতঃ দুটি

$$\pi^{\pm} \rightarrow \mu^{\pm} + \nu$$
$$\rightarrow e^{\pm} + \nu$$

তবে দ্বিতীয় ধরণটির দ্বারা ক্ষয়ণ ঘটার সম্ভাব্যতা অপেক্ষাকৃত অনেক কম ($1{\cdot}24 \times 10^{-2}$ %) নানা পরীক্ষায় $\pi^{\pm}$-মেসনের ঘূর্ণিও নির্দ্ধারিত হয়েছে, এর পরিমাণ শূন্য।

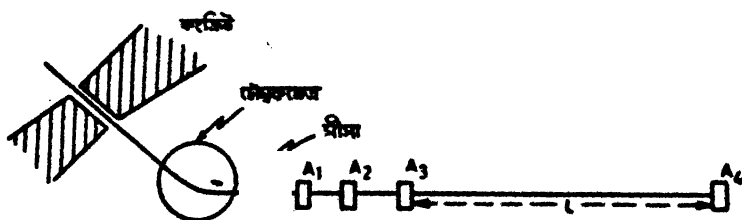
পাইমেসনের ভর

12·17 চিত্রে অনুসৃত চক্রত্বরকের সাহায্যে উৎপন্ন পাইমেসনের ভর নির্ণয়ের একটি পদ্ধতির আয়োজন বর্ণনা করা হয়েছে যার দ্বারা মহাজাগতিক রশ্মির পরীক্ষার তুলনায় অনেক বেশী নির্ভুলভাবে ভরের পরিমাপ করা সম্ভব। একটি অনুসৃত চক্রত্বরকের অভ্যন্তরে প্রোটনের আঘাতে পাইমেসন উৎপন্ন করা হয় এবং উৎপন্ন ধন ও ঋণ -আহিত মেসনগুলি এক একটি অর্দ্ধবৃত্তাকার পথে ভ্রমণ ক'রে অবশেষে তামার প্রতিবন্ধকের দ্বারা সৃষ্ট একটি সঙ্কীর্ণ ফাঁকের মধ্যে দিয়ে এসে ফোটোগ্রাফীর প্লেটের উপর পড়ে এবং অবদ্রবের ভিতর এদের গতিপথের

চিত্র 12·17 : গবেষণাগারে উৎপন্ন পাইমেসনের ভর নির্ণয়ের পরীক্ষার আয়োজন।

ছাপ রেখে যায়। কার্বন ঘাতবহ এবং ফোটোগ্রাফীর প্লেট উভয়ই অনুসৃত চক্রত্বরকের চুম্বকের মেরুদ্বয়ের মাঝখানেই থাকে যার ফলে উৎপন্ন মেসনগুলি ঐ চুম্বকের ধ্রুব ক্ষেত্রের দ্বারা বিচ্যুত হতে পারে। তীরচিহ্নিত অভঙ্গ রেখার সাহায্যে ত্বরণযন্ত্রে ত্বরিত প্রোটনের প্রবাহধারাকে নির্দ্দেশ করা হয়েছে। চৌম্বকক্ষেত্রের তীব্রতার পরিমাণ জানা থাকলে পাইমেসনের গতিপথের ব্যাসার্দ্ধ জেনে এর ভরবেগ মাপা যায়, ভরবেগ এবং অবদ্রবের ভিতর কণাটির মোট

দৌড়দূরত্বের পরিমাণ থেকে এর ভর নির্ণয় করা সম্ভব। তবে চৌম্বকক্ষেত্রের তীব্রতার পরিমাণ শুদ্ধভাবে নির্দ্ধারণ করা অপেক্ষাকৃত কঠিন, তার ফলে নির্ভুলতর পরিমাপের জন্য অনুসৃত চক্রত্বরকের অভ্যন্তরেই অপর একটি ট্যাংস্টেনের ঘাতবহের উপর প্রোটনের বিকৃরণ ঘটিয়ে বিকৃরিত প্রোটনের একটি ধারাকে ঐ একই ফোটোগ্রাফীর প্লেটের উপর এনে ফেলা হয়। একটি তামার পাতের দ্বারা আবৃত বাঁকান ফাঁকের সাহায্যে প্রোটনের গতিপথের ব্যাসার্দ্ধ এমনভাবে স্থির করা হয় যাতে মেসনের প্রায় সমান গতিবেগ-সম্পন্ন প্রোটন প্লেটের উপর এসে পড়ে। তারপর সমগতিবেগবিশিষ্ট বিন্দু থেকে আরম্ভ ক'রে উভয় কণার ক্ষেত্রেই বাকি দৌড়দূরত্ব পরিমাপ ক'রে 12·3 সম্বন্ধটি ব্যবহার ক'রে প্রোটনের সঙ্গে তুলনা ক'রে পাইমেসনের ভর মাপা যায়। এই পদ্ধতিতে খুবই শুদ্ধ ফল পাওয়া সম্ভব এবং এভাবে পরিমাপ ক'রে দেখা গেছে যে π^+ এবং π^- মেসনের ভর অভিন্ন।

পাইমেসনের গড় জীবনকাল

12·18 চিত্রে পাইমেসনের গড় জীবনকাল পরিমাপের একটি আয়োজন দেখান হয়েছে। ত্বরণযন্ত্রে উৎপন্ন পাইমেসনগুলিকে এক সঙ্কীর্ণ

চিত্র 12·18 : পাইমেসনের গড় জীবনকাল নির্ণয়ের পদ্ধতি।

ফাঁকের সাহায্যে একটি সরু ধারায় পরিণত করা হয় এবং এই ধারাটি চৌম্বকক্ষেত্রের ভিতর বেঁকে গিয়ে তাৎক্ষণিকতা আয়োজনে আবদ্ধ পরপর তিনটি চমক গণনকার A_1, A_2, A_3 এর ভিতর দিয়ে বেরিয়ে এসে A_3 থেকে নির্দিষ্ট দূরত্বে বসান অপর একটি গণনকারের ভিতর দিয়ে পড়ে। A_3 ও A_4 এর ভিতর দূরত্ব L পরিবর্তিত করা হয়। তিনটি গণনকারের ভিতর কতগুলি ক'রে তাৎক্ষণিক ঘটনা ধরা পড়ছে তা গণনা ক'রে প্রবাহ-ধারার ভিতর পাইমেসনের সংখ্যা জানা যায়। L দূরত্ব অতিক্রম করার সময়

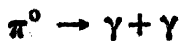
কিন্তু মেসন ক্ষরিত হয়, A_2 এর ভিতর কি পরিমাণে মেসন নির্দেশিত হচ্ছে তাদেরকে L দূরত্বের মধ্যে কতগুলি মেসন ক্ষরিত হয় তা নির্দ্ধারিত হয়। L এর পরিমাণ বাড়িয়ে কমিয়ে বিভিন্ন দূরত্বে ক্ষরণের পরিমাণ নির্দ্ধারণ করা যায়। চৌম্বকক্ষেত্রের ব্যবহারের দ্বারা গতিবেগ নির্দ্ধারণের পর এই পরীক্ষা থেকে π-মেসনের গড় জীবনকাল মাপা সম্ভব হয়।

এদের জীবনকাল মাপার সহজতর পদ্ধতি হ'ল বুদ্‌বুদকক্ষ বা মেঘকক্ষের ভিতর বহুসংখ্যক পাইমেসনের গতিপথ লক্ষ্য করা; যদি গতিপথের উপর প্রতিবিন্দুতে গতিবেগ জানা থাকে তবে কতক্ষণ পরপর বিভিন্ন কণার ক্ষরণ ঘটছে তা সহজেই নির্দ্ধারণ করা যায়। এই পদ্ধতিতে পাইমেসনের তুল্য জীবনকালবিশিষ্ট অন্যান্য অস্থায়ী কণাদেরও গড় জীবনকাল মাপা সম্ভব। আধুনিক পরীক্ষালব্ধ $\pi^{\pm}$-মেসনের গড় জীবনকালের পরিমাণ 2.55×10^{-8} সেকেণ্ড।

π^0-মেসন

π^+ এবং π^- ছাড়া আরও একপ্রকার পাইমেসন আছে, একে বলা হয় π^0-মেসন, এটি আধানবিহীন। $\pi^{\pm}$-মেসনের তুলনায় এর ভর সামান্য কিছু কম এবং গড় জীবনকাল খুবই কম, প্রায় 10^{-16} সেকেণ্ড। জীবনকাল এত কম এবং আধানের পরিমাণ শূন্য হওয়ায় $\pi^{\pm}$ মেসনের ক্ষেত্রে যেসব পদ্ধতি প্রয়োগ ক'রে ভর, অর্দ্ধজীবনকাল ইত্যাদি মাপা হয়, π^0-মেসনের ক্ষেত্রে সেগুলি প্রয়োগ করা যায় না। কিন্তু এসব অসুবিধা সত্ত্বেও π^0-মেসনের ভর অত্যন্ত নির্ভুলভাবে মাপা সম্ভব হয়েছে। 180 থেকে 350 এমইভি পর্য্যন্ত শক্তির প্রোটনের সাহায্যে কেন্দ্রীনের উপর সংঘর্ষ ঘটিয়ে দেখা গেছে তার ফলে অত্যন্ত উচ্চশক্তির গামারশ্মি উৎপন্ন হয়, এইসব গামারশ্মির শক্তি 70 এমইভি কিংবা তার বেশী থাকে। প্রোটন কেন্দ্রীন সংঘর্ষে যেসব পদ্ধতিতে গামারশ্মি উৎপন্ন হতে পারে, যেমন ত্বরণ-বিকিরণ কিংবা কেন্দ্রীনের উত্তেজন, সেগুলির দ্বারা এত অধিক শক্তির গামারশ্মি উৎপন্ন হওয়া সম্ভব নয়, বিজ্ঞানীরা তাই অনুমান করলেন যে এক্ষেত্রে আসলে একটি নূতন আধানবিহীন কণা উৎপন্ন হয়ে তারপর গামারশ্মি বিকিরণ ক'রে ক্ষরিত হচ্ছে। এভাবেই সর্ব্বপ্রথম পরীক্ষাগারে π^0-মেসনের অবস্থিতি সম্বন্ধে অবগত হওয়া যায়।

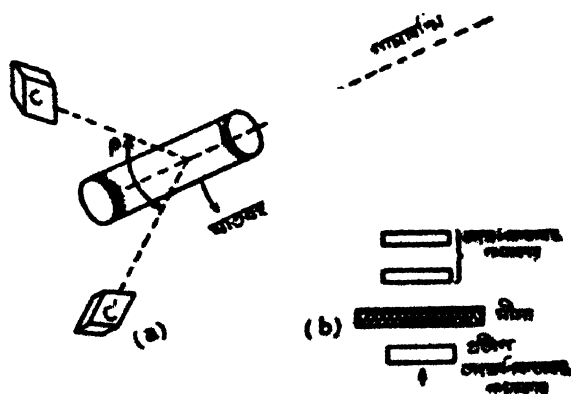
π^0-মেসনের ক্ষরণপদ্ধতি নিম্নরূপ :

$$\pi^0 \rightarrow \gamma + \gamma$$

মার্কিন বিশ্ববিদ্যালয়ে প্যানফস্কি (Panofsky) এবং তাঁর সহকর্মিবৃন্দ

রাজ্যাই π^0-মেসন উৎপন্ন হচ্ছে কিনা তা নির্ধারণ করার জন্য একটি খুব সুন্দর পরীক্ষা করেন, 12·19 চিত্রে তাঁদের পরীক্ষার আয়োজন দেখান হয়েছে। π^0-মেসন উৎপন্ন করা হয় 175 থেকে 330 এমইভি শক্তিশালী γ-রশ্মি আলোককণার দ্বারা সংঘর্ষ ঘটিয়ে, নিম্নলিখিত বিক্রিয়াটির দ্বারা π^0-মেসন উৎপন্ন হতে পারে

$$\gamma + p \rightarrow p + \pi^0$$

এত শক্তিশালী গামারশ্মি পরীক্ষাগারে উৎপন্ন করা-হয়েছিল বার্কলি ইলেকট্রন অনুসৃত ত্বরকের সাহায্যে ত্বরিত অত্যচ্চ শক্তিশালী ইলেকট্রনের দ্বারা কোন ধাতবহের উপর আঘাত ক'রে, তখন এদের স্বরণ-বিকিরণের দ্বারা এইপ্রকার শক্তিশালী গামারশ্মি উৎপন্ন করা সম্ভব।

চিত্রে দেখা যাচ্ছে যে, গামারশ্মিপ্রবাহ একটি ধাতবহের উপর এসে পড়েছে, ঐ ধাতবহের দুপাশে c, c' হ'ল দুটি আলোককণা গণনকার, এরা উচ্চশক্তির আলোককণা গণ্য করতে এবং তাদের শক্তি পরিমাপ করতে পারে।

চিত্র 12·19

(a) $\pi^0 \rightarrow \gamma + \gamma$ ক্ষয়ণ পর্যবেক্ষণের পরীক্ষার আয়োজন;

(b) c ও c' গণনকারদ্বয়ের আভ্যন্তরীণ আয়োজন।

এ-দুটি গণনকার ধাতবহটির দুপাশে প্রতিসমভাবে স্থাপিত এবং তাৎক্ষণিকতা আয়োজনে যুক্ত। তাৎক্ষণিক ঘটনাগুলি বিচার ক'রে লক্ষ্য করা গেল যে আলোককণা দুটির প্রত্যেকটির শক্তি প্রায় 70 এমইভি এবং ঊর্ধ্বে, এছাড়া 175 থেকে 330 এমইভি পর্যন্ত আপতিত আলোককণার শক্তি

বৃদ্ধি করলে তাৎক্ষণিক ঘটনার সংখ্যা প্রায় 50 গুণ বৃদ্ধি পায় অর্থাৎ অধিকতর শক্তিতে π°-মেসনের উৎপাদনের প্রস্থচ্ছেদ অনেক বৃদ্ধি পায়। সীসা এবং বেরিলিয়ামের ধাতবহ নিয়ে পরীক্ষা ক'রে দেখা গেল যে সীসার ভিতর উৎপাদনের পরিমাণ মাত্র ছয়গুণ বেশী, যেখানে সীসার ভিতর সাধারণ গণনা সৃষ্টির প্রস্থচ্ছেদ হবে অন্ততঃ 400গুণ বেশী, এথেকেও বোঝা যায় যে এই গামারশ্মিগুলি আসলে উৎপন্ন হচ্ছে কেন্দ্রীনের কোন বিক্রিয়া থেকে।

যদি মেসনটি স্থির অবস্থা থেকে ক্ষরিত হয় তবে ভরবেগ সংরক্ষণ হেতু আলোককণা দুটি পরস্পরের সম্পূর্ণ বিপরীত দিকে নির্গত হবে, কিন্তু গতিশীল মেসনের ক্ষরণ ঘটলে আলোককণাদ্বয়ের গতিপথের মধ্যে কোণ 180 ডিগ্রির কম হবে। তাৎক্ষণিক গণনার হার চিত্রে প্রদর্শিত β কোণের অপেক্ষক হিসাবে মাপা হয়েছিল, দেখা যায় যে গণনার হার চরম অবস্থায় উপনীত হয় যখন এই কোণের পরিমাণ থাকে 80° থেকে 90° ডিগ্রির মধ্যে। এর অর্থ হ'ল যে কণাটির ক্ষরণ ঘটছে সেটি অন্ততঃ $\sim 0{\cdot}8c$ গতিবেগ নিয়ে ভ্রমণ করছে। একটি হাল্কা মেসনের পক্ষে এই গতিবেগ অর্জ্জন করা অপেক্ষাকৃত সহজ, কিন্তু অপেক্ষাকৃত অনেক ভারী কোন কেন্দ্রকণার পক্ষে 330 এমইভি আলোককণার সঙ্গে সংঘর্ষে এত অধিক গতিবেগ অর্জ্জন করা সম্ভব নয়।

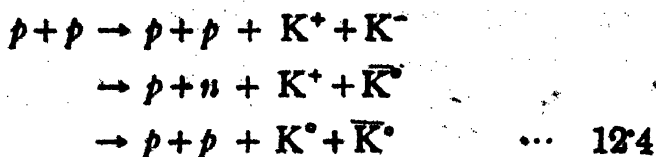
পাশের চিত্রে [12·19(b)] c, c' গণনকার দুটির অভ্যন্তরের আয়োজন পৃথকভাবে দেখান হয়েছে। উভয়ের মধ্যেই রয়েছে তিনটি ক'রে চমক গণনকার, এদের মধ্যে শেষের দুটি তাৎক্ষণিক এবং প্রথমটি এদের সঙ্গে প্রতীপ তাৎক্ষণিক আয়োজনের দ্বারা একটি বর্ত্তনীতে যুক্ত। একটি $\frac{1}{4}$ ইঞ্চি সীসার পাত প্রথম ও দ্বিতীয় গণনকার দুটির মাঝখানে রয়েছে, এর কাজ হ'ল আপতিত আলোককণার দ্বারা ইলেকট্রন উৎপন্ন করা। আলোককণাটি প্রথম গণনকারটিতে গণ্য হবে না কিন্তু সীসার ভিতর ইলেকট্রনে রূপান্তরিত হয়ে শেষের দুটিতে গণ্য হবে।

প্যানোফ্‌স্কির পরীক্ষা নিঃসন্দেহে π°-মেসনের অস্তিত্ব প্রমাণ করে, আরও অন্যান্য উপায়েও π°-মেসন পর্য্যবেক্ষণ করা সম্ভব হয়েছে, এর অধুনাস্বীকৃত ভরের পরিমাণ 264 m_e।

K-মেসন

অনুসৃত ধারকের সাহায্যে π-মেসনের তুলনায় কিছু ভারী অপর এক ধরণের কতগুলি কণা আবিষ্কৃত হয়েছে, এদের সাধারণ নাম হ'ল K-মেসন, মহাজাগতিক রশ্মির ভিতরও এদের লক্ষ্য করা গিয়েছে। K^+, K^-, K° এবং

$\overline{K^0}$ এই চার প্রকারের ভিন্ন ভিন্ন K-কণার সন্ধান পাওয়া যায়, এদের মধ্যে K^0 এবং $\overline{K^0}$ আধান শূন্য, K^+ ও K^- যথাক্রমে ধন ও ঋণ আহিত। প্রোটন-প্রোটন সংঘর্ষে নিম্নলিখিত বিক্রিয়াগুলির দ্বারা K-মেসন উৎপন্ন করা হয়ঃ

$$p+p \rightarrow p+p + K^+ + K^-$$
$$\rightarrow p+n + K^+ + \overline{K^0}$$
$$\rightarrow p+p + K^0 + \overline{K^0} \quad \cdots \quad 12.4$$

তাছাড়া শক্তিশালী π-মেসনের আঘাতেও K-মেসন উৎপন্ন করা যায়। প্রোটন ও পাইমেসন ঘটিত বিক্রিয়ায় K-মেসনগুলিকে সবসময় জোড়ায় জোড়ায় উৎপন্ন হতে দেখা যায়।

K-মেসনগুলির ভর হ'ল নিম্নলিখিত পরিমাণের ঃ

$$m_{K^\pm} = 493.76 \text{ এমইভি}$$
$$m_{K^0} = 497.7 \text{ এমইভি}$$

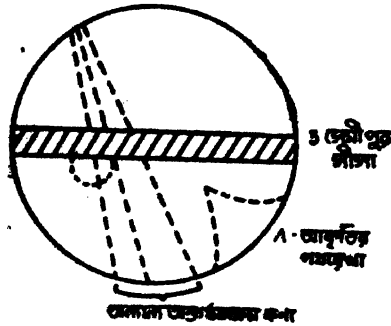
$K^\pm$-মেসনের গড় জীবনকাল $\pi^\pm$ জীবনকালের প্রায় তুল্য পরিমাণের

$$\tau_{K^\pm} = 1.2 \times 10^{-8} \text{ সেকেণ্ড}$$

এজন্য যেসব পদ্ধতিতে $\pi^\pm$-মেসনের ভর, গড় জীবনকাল মাপা হয় সেগুলি $K^\pm$-মেসনের ক্ষেত্রেও প্রযোজ্য। K^0 এবং $\overline{K^0}$ মেসনদ্বয়ের ভর অভিন্ন, এদের উভয়েরই আধান শূন্য কিন্তু তাহলেও এদের মধ্যে কতগুলি মৌলিক পার্থক্য আছে। $K^\pm$ কণাদ্বয়ের বহুসংখ্যক ক্ষয়ণের ধরণ আছে, পরিশিষ্টের সারণীতে এগুলি লিপিবদ্ধ করা হয়েছে। পাইমেসনদের মত প্রতিটি K-মেসনেরও ঘূর্ণির পরিমাণ শূন্য। K-মেসনদের ধর্মাবলী অর্থাৎ এদের উৎপাদন ও বিক্রিয়া-পদ্ধতির সঙ্গে পাইমেসনদের ধর্মাবলীর কতগুলি অত্যন্ত তাৎপর্যাপূর্ণ পার্থক্য লক্ষিত হয়, ঐগুলি আমরা একটু পরেই আলোচনা করব।

Λ-কণা

মহাজাগতিক রশ্মির গবেষণায় মেঘকক্ষের ভিতর কতগুলি Λ (গ্রীক অক্ষর 'ল্যামডা') আকৃতির গতিপথের ছবি পাওয়া যায়, 12.20 চিত্রে এই ছবিগুলি কিরকম হয় তা ছক এঁকে বোঝান হয়েছে। এই ছবিগুলি তোলা হয় নিম্নলিখিত উপায়েঃ একটি তীব্র অন্তর্ঘাতকম কণার গণনা প্রতিবন্ধক ও গণনকারের বিশেষ আয়োজনের দ্বারা বেছে নেওয়া হয়। ঐ আয়োজনের ভিতর একটি মেঘকক্ষ থাকে এবং এটিকে ইলেকট্রনিক বর্তনীর সাহায্যে ঠিক সেই

ব্যবস্থা চালু করা হয় যেন অন্তর্গমনক্ষম কণাগুলির ছবি এর ভিতর উঠতে পারে। ছবি দেখে মনে হয় যে একটি আধানবিহীন কণা মেঘকক্ষের ভিতর প্রবেশ করছে কিংবা মেঘকক্ষের অভ্যন্তরস্থ ধাতুর পাতের ভিতর উৎপন্ন হচ্ছে, তারপর কিছুদূর অগ্রসর হবার পর কণাটি দুটি আহিত কণায় বিভক্ত হয়ে ক্ষয়িত হয়েছে। আয়নীভবনের পরিমাণ এবং চৌম্বকদৃঢ়তা থেকে কণা দুটির প্রকৃতি

চিত্র 12·20

সহজেই নির্দ্ধারণ করা যায়, এরা হ'ল একটি প্রোটন এবং একটি পাইমেসন। দৌড়দূরত্ব পরিমাপ ক'রে এদের প্রাথমিক শক্তি পরিমাপ করা যায়। Λ ক্ষরণের ক্ষেত্রে শক্তি ও ভরবেগ সংরক্ষণের সর্ত হ'ল

$$E_\Lambda = E_p + E_\pi \qquad \vec{p}_\Lambda = \vec{p}_p + \vec{p}_{\pi^-}$$

আপেক্ষিকতাতত্ত্বের ভর, ভরবেগ ও শক্তির সম্বন্ধসূচক 2·39 সূত্রটি প্রয়োগ ক'রে Λ-কণার ভরের জন্য আমরা লিখতে পারি

$$M_\Lambda^2 c^4 = E_\Lambda^2 - p_\Lambda^2 c^2$$

এইবার শক্তি এবং ভরবেগ সংরক্ষণের সূত্র প্রয়োগ করলে

$$\begin{aligned} M_\Lambda^2 c^4 &= (E_p + E_{\pi^-})^2 - (\vec{p}_p + \vec{p}_{\pi^-})^2 c^2 \\ &= (E_p + E_{\pi^-})^2 - p_p^2 - p_{\pi^-}^2 \\ &\qquad - 2p_\pi p_p \cos\theta \quad \cdots\ 12{\cdot}5 \end{aligned}$$

এই সমীকরণের ডানপাশে আবির্ভূত রাশিগুলি, যেমন শক্তি, ভরবেগ এবং $\vec{p}_\pi$ ও $\vec{p}_p$ এর ভিতর কোণ θ, পরীক্ষায় মাপা সম্ভব, সুতরাং এভাবে ডানপাশের রাশিটি গণনা করলে তাথেকে M_Λ-এর পরিমাণ নির্দ্ধারিত হয়। বহুসংখ্যক পরীক্ষায় এইভাবে M_Λ-এর যে পরিমাণ নির্ণীত হয়েছে তা পরস্পরের সঙ্গে

জীভন এবং এথেকে Λ-কণার বিদেহ করণপ্রকৃতি প্রতিপন্ন হয়। Λ আকৃতির গতিপথ সৃষ্টি করে এবং আধানবিহীন, এজন্য কণাটিকে অনেক-সময় বলা হয় Λ^0-কণা, এর ভর ও জীবনকালের পরিমাণ

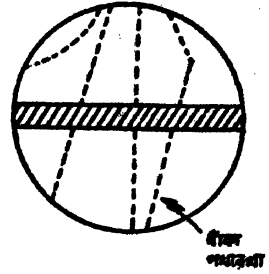
$$m_\Lambda = 1115{\cdot}4 \text{ এমইভি}$$
$$\tau_\Lambda = 2{\cdot}6 \times 10^{-10} \text{ সেকেণ্ড}$$

Λ-কণার একাধিক করণের ধরণ আছে, তবে $\Lambda \rightarrow p + \pi^-$ ধরণটিই সর্বাধিক দৃষ্ট হয়। Λ-কণার ঘূর্ণ $\frac{1}{2}h$। K, π ইত্যাদি কণাগুলিকে যেমন মেসন আখ্যা দেওয়া হয়, তেমনি নিউট্রন, প্রোটন, ল্যামডা ইত্যাদি কণাগুলিরও একত্র একটি স্বতন্ত্র নামকরণ আছে, এদের বলা হয় ব্যারিয়ন। ব্যারিয়ন ও মেসন আখ্যাধারী কণাদের ধর্মাবলীর মধ্যে যে বিশেষ পার্থক্য আছে তা এদের করণের প্রকৃতি অনুধাবন করলেই বোঝা যাবে। বিভিন্ন মেসনের করণপ্রকৃতি লক্ষ্য করলে দেখা যায় যে শেষ পর্যন্ত যে কণাগুলি উৎপন্ন হয় সেগুলি হ'ল ইলেকট্রন, পজিট্রন এবং নিউট্রিনো কিংবা আলোককণা। কিন্তু একটি ব্যারিয়নের করণে অন্যান্য কণাদের সঙ্গে শেষ পর্যন্ত একটি প্রোটনও উৎপন্ন হয়। এই ঘটনাটি ব্যারিয়ন সংরক্ষণ নীতির একটি ফল, এই নীতি অনুসারে যেকোন ব্যারিয়নের করণে শেষ পর্যন্ত অপর একটি স্থায়ী ব্যারিয়ন উৎপন্ন হবে। এই ধরণের করণের নিদর্শন পরে আরও দেওয়া হবে। যেহেতু প্রোটনের চেয়ে হাল্কা কোন ব্যারিয়নের অস্তিত্ব নেই, এজন্য প্রোটনের কোন করণ ঘটতে পারে না। মেসন ও ব্যারিয়নদের মধ্যে অপর একটি পার্থক্য হ'ল যে বিভিন্ন মেসনদের ঘূর্ণের পরিমাণ সবসময়ই শূন্য অথবা h এর কোন অখণ্ডসংখ্যক গুণিতক, কিন্তু ব্যারিয়নদের ঘূর্ণের পরিমাণ সবসময়ই h এর কোন অর্ধ-অখণ্ডসংখ্যক গুণিতক।

Σ-কণা

Λ-কণার মত Σ (গ্রীক অক্ষর 'সিগমা')-কণাও অপর একটি ব্যারিয়ন যা প্রথম মহাজাগতিক রশ্মির ভিতর দৃষ্ট হয়। তিন রকমের সিগমা-কণা দেখা যায়, ধন ও ঋণ -আহিত এবং আধান শূন্য, এদের ধর্মাবলী বুদ্বুদকক্ষের পরীক্ষায় জানা সম্ভব হয়েছে। এরাও অস্থায়ী কণা, এদের করণের প্রকৃতি নিম্নরূপ

$$\begin{aligned} \Sigma^+ &\rightarrow n + \pi^+ \\ &\rightarrow p + \pi^0 \qquad \cdots \quad 12{\cdot}6 \\ \Sigma^- &\rightarrow n + \pi^- \\ \Sigma^0 &\rightarrow \Lambda + \gamma \end{aligned}$$

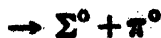
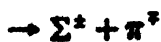
এদের ভর এবং গড় জীবনকালের পরিমাণ পরিশিষ্টের তালিকায় দেওয়া হয়েছে ; প্রত্যেক প্রকার Σ-কণার ঘূর্ণির পরিমাণ $\frac{1}{2}\hbar$। মেঘকক্ষের ভিতর আহিত Σ-কণার গতিপথ কিরকম হয় তার একটি উদাহরণ 12·21 চিত্রে দেখান হয়েছে, ছবিতে দেখা যাচ্ছে যে একটি আহিতকণার গতিপথ মেঘকক্ষের ভিতর কিছুদূর অগ্রসর হবার পর সহসা বেঁকে গিয়েছে। ছবিটি দেখে বোঝা যায় যে, আহিত একটি কণা মেঘকক্ষের মধ্যে কিছুদূর অগ্রসর হবার পর একটি আহিত এবং একটি আধানবিহীন কণায় ক্ষরিত হচ্ছে। পরে

চিত্র 12·21

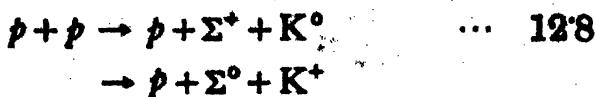
বুদ্বুদকক্ষের ভিতর কৃত্রিম উপায়ে উৎপন্ন Σ-মেসনগুলির গতিপথের ছবিতে আয়নীভবনের ঘনত্ব পরীক্ষা ক'রে দেখা যায় যে, প্রাথমিক পথরেখাটি সৃষ্টির জন্য দায়ী যে কণাটি তার ভর প্রোটনের তুলনায় বেশী কিন্তু আধান প্রোটনের সমান, ক্ষরণোত্তর গতিপথটি যে প্রোটনের দ্বারা সৃষ্ট তাও সহজেই বোঝা যায়। পরীক্ষাগারে Σ-কণাগুলিকে খুব স্বল্পশক্তি অবস্থায় উৎপন্ন করা সম্ভব, তখন এদের ক্ষরণ ঘটে স্থির অবস্থা থেকে। ক্ষরণের ধরণ যদি $\Sigma^+ \rightarrow p + \pi^0$ হয় তাহলে প্রোটনের ভরবেগ পরিমাপ ক'রে এবং ভরবেগ সংরক্ষণের সূত্র প্রয়োগ ক'রে অদৃশ্য পাইমেসনের ভরবেগ এবং তাথেকে এর শক্তি পরিমাপ করা যায়। এইভাবে ক্ষরণ প্রক্রিয়াটির Q-পরিমাণ নির্দ্ধারণ করা হলে তখন তার সাহায্যে Σ^+-মেসনের ভর নির্ণীত হয়। এরকম বহুসংখ্যক পরীক্ষায় $\Sigma^\pm$-ব্যারিয়নদের ভর মাপা হয়েছে, এদের ভরের মধ্যে সামান্য পার্থক্য দৃষ্ট হয় :

$$M_{\Sigma^+} = 1189{\cdot}2 \text{ এমইভি}$$

$$M_{\Sigma^-} = 1197{\cdot}6 \text{ এমইভি}$$

অনুসৃত ত্বরকের সাহায্যে উৎপন্ন K^--মেসন দ্বারা প্রোটনকে আঘাত করলে অপেক্ষাকৃত সহজে সিগমা ও ল্যামডা কণা উৎপন্ন করা যায় ; নিম্নলিখিত বিক্রিয়াগুলি ঘটতে দেখা যায় :

$$\begin{aligned} K^- + p &\rightarrow \Lambda + \pi^0 \\ &\rightarrow \Sigma^\pm + \pi^\mp \\ &\rightarrow \Sigma^0 + \pi^0 \end{aligned} \qquad 12{\cdot}7$$

তাছাড়া প্রোটন-প্রোটন সংঘর্ষেও এই কণাগুলি উৎপন্ন হতে পারে

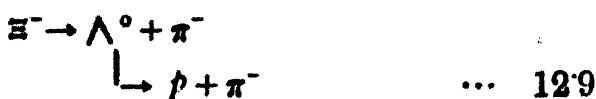
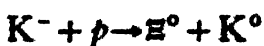
$$p+p \rightarrow p+\Sigma^{+}+K^{0} \quad \cdots \quad 12{\cdot}8$$
$$\rightarrow p+\Sigma^{0}+K^{+}$$

প্রোটন-প্রোটন সংঘর্ষে Σ এবং Λ কণা সবসময়ই K^{+} অথবা K^{0} মেসনের সঙ্গে একত্রে উৎপন্ন হয়, এজন্য অপেক্ষাকৃত অধিক শক্তির আপাতিত প্রোটনের প্রয়োজন হয়।

Ξ-কণা

বুদ্বুদকক্ষের ভিতর আরও একটি ব্যারিয়নের উৎপাদন লক্ষ্য করা সম্ভব হয়েছে, কণাটির গড় জীবনকাল Λ এবং Σ কণার জীবনকালের সঙ্গে তুলনীয়, তবে কণাটি এদের চেয়ে বেশী ভারী (পরিশিষ্টের সারণী দ্রষ্টব্য)। কণাটিকে Ξ (গ্রীক অক্ষর 'কাস্কেড') কণা আখ্যা দেওয়া হয়েছে। বস্তুতঃ দুই রকমের Ξ কণা দৃষ্ট হয়, ঋণ-আহিত এবং আধানশূন্য, এদেরও উভয়ের ঘূর্ণির পরিমাণ $\frac{1}{2}\hbar$, এদের মধ্যে সামান্য ভরের পার্থক্য আছে। Ξ-কণার ক্ষরণের প্রকৃতি নিম্নরূপ :

$$\Xi^{-} \rightarrow \Lambda^{0}+\pi^{-}$$
$$\quad\quad \hookrightarrow p+\pi^{-} \quad \cdots \quad 12{\cdot}9$$
$$\Xi^{0} \rightarrow \Lambda^{0}+\pi^{0}$$

π^{-} এবং K^{-}-মেসনের আঘাতে Ξ-কণা উৎপন্ন করা যায়

$$\pi^{-}+n \rightarrow \Xi^{-}+K^{0}+K^{0} \quad \cdots \quad 12{\cdot}10$$
$$K^{-}+p \rightarrow \Xi^{0}+K^{0}$$

এপর্যন্ত আমরা মৌলিক কণাজগতে আবিষ্কৃত কয়েকপ্রকার মেসন ও ব্যারিয়নের প্রাথমিক ধর্মাবলীর সংক্ষিপ্ত বিবরণ দিলাম, এছাড়া আরও বহুসংখ্যক "মৌলিক কণা" পরবর্তী কালে ত্বরণযন্ত্রের সাহায্যে আবিষ্কৃত হয়েছে কিন্তু তাদের বিবরণ দেবার সুযোগ এখানে নেই। বহুসংখ্যক কণার পরিচয় জানা গেলে স্বভাবতই মনে প্রশ্ন জাগে যে এরা পরস্পরের মধ্যে কোনরকম সম্বন্ধের দ্বারা আবদ্ধ কিনা। যদি প্রতিটি কণাকেই একটি স্বতন্ত্র সত্তা হিসাবে গণ্য করতে হয় তবে পদার্থবিজ্ঞান অনেক বেশী জটিল হয়ে পড়ে। তুলনা হিসাবে উল্লেখ করা যায় হাইড্রোজেন বর্ণালীর রেখাগুলির

কণা, বামার সূত্র আবিষ্কারের আগে এদের প্রত্যেকটিই এক একটি পরস্পর নিরপেক্ষ ঘটনা হিসাবে বিজ্ঞানীদের কাছে প্রতিভাত হ'ত, কিন্তু বামার সূত্র আবিষ্কারের পর দেখা গেল যে এইসব রেখার স্পন্দনাঙ্ক পরস্পরের সঙ্গে অতি সহজ সূত্রের দ্বারা আবদ্ধ এবং তারপর বোর তত্ত্ব উদ্ভাবিত হলে সমগ্র হাইড্রোজেন বর্ণালীর প্রকৃতি পদার্থবিজ্ঞানের সর্বজনীন নীতিগুলির দ্বারা সহজেই বিশ্লেষণ করা সম্ভব হ'ল। পদার্থবিজ্ঞানের ইতিহাসে অনেকসময়ই দেখা যায় যে প্রথম প্রথম পরীক্ষার সাহায্যে দ্রুতগতিতে বহুসংখ্যক আপাত-নিরপেক্ষ ঘটনাবলী আবিষ্কৃত হয় যেগুলির সহজ ব্যাখ্যা তখনই পাওয়া যায় না। কিন্তু ঐসব ঘটনাবলীর মধ্যে ক্রমশঃ কতগুলি পারস্পরিক সম্বন্ধ লক্ষ্য করা যায় এবং পরে দেখা যায় যে, ঐ সম্বন্ধগুলি পদার্থবিজ্ঞানের কতগুলি অভিনব নীতি বা তত্ত্বের প্রযুক্তির ফলেই সম্ভব হয় এবং তখন সমগ্র ঘটনাবলীর একটি সুসমঞ্জস বিশ্লেষণ পাওয়া যায়। মৌলিককণার ক্ষেত্রেও এর ব্যতিক্রম হয়নি, প্রথম প্রথম এক রাশি কণা আবিষ্কৃত হবার পর বিজ্ঞানীরা এদের তাৎপর্য্য সম্বন্ধে খানিকটা অপ্রস্তুত হয়ে পড়লেও শীঘ্রই তাঁরা বিভিন্ন কণার ধর্ম্মাবলীর মধ্যে কতগুলি সামঞ্জস্য খুঁজে বার করলেন যার দ্বারা কণাগুলির শ্রেণীবিভাগকরণ অনেকটা সহজ হয়ে পড়ল। অবশ্য একথা স্বীকার করতেই হবে যে, এমন কোন তত্ত্ব এখনও পর্য্যন্ত আবিষ্কৃত হয়নি যার দ্বারা এপর্য্যন্ত দৃষ্ট বিভিন্ন মৌলিককণার যাবতীয় ধর্ম্মাবলী সার্ব্বিক ও সুসমঞ্জস ব্যাখ্যা দেওয়া যায়। মৌলিককণাদের বিষয়ে এখনও ব্যাপক গবেষণা চলছে এবং এদের ধর্ম্মাবলী ও প্রকৃতি বর্ত্তমানে পদার্থবিজ্ঞানে এক অন্যতম সমস্যামূলক বিষয়। পরবর্ত্তী পরিচ্ছেদগুলিতে আমরা মৌলিককণাদের ভিতর এপর্য্যন্ত আবিষ্কৃত কতগুলি প্রতিসাম্যের বিষয় সংক্ষেপে আলোচনা করব।

আইসোঘূর্ণি (Isospin)

বিভিন্ন কণাদের মধ্যে একটি প্রতিসাম্য খুঁজে বার করার প্রথম প্রচেষ্টা বিজ্ঞানী হাইসেনবার্গের ; নিউট্রন আবিষ্কৃত হবার পর তিনিই প্রথম প্রস্তাব করেন যে নিউট্রন ও প্রোটনকে একই কেন্দ্রকণার দুই বিভিন্ন অবস্থা হিসাবে কল্পনা করা যেতে পারে। তিনি প্রোটন ও নিউট্রনের মধ্যে একটি নূতন ধর্ম্মের অস্তিত্বের প্রস্তাব করলেন, একে বলা হয় আইসোটোপীয় ঘূর্ণি বা আইসোঘূর্ণি। আইসোঘূর্ণির ধারণা বহুক্ষেত্রে কণাদের সাধারণ ঘূর্ণির ধারণার সঙ্গে সমান্তরাল। আমরা পূর্ব্ববর্ত্তী আলোচনা থেকে জানি যে যদি একটি কণার ঘূর্ণি হয় S তাহলে কোন নির্দ্দিষ্ট দিকে এর $2S+1$ সংখ্যক অভিক্ষেপ থাকবে। এইভাবেই, যদি কণাটির আইসোঘূর্ণির পরিমাণ

হয় I, তবে এটি মোট $2I+1$ সংখ্যক বিভিন্ন আহিত অবস্থায় অবস্থান করবে। একটি কেন্দ্রকণার ক্ষেত্রে আইসোঘূর্ণির পরিমাণ $I=\frac{1}{2}$, সুতরাং এটি মোট দুটি বিভিন্ন আহিত অবস্থায় অবস্থান করতে পারে, এই দুটি অবস্থা হ'ল যথাক্রমে প্রোটন এবং নিউট্রন। স্বাভাবিকভাবে ঘূর্ণি বলতে আমরা বুঝি ত্রিমাত্রিক দেশের ভিতর একটি কণার ঘূর্ণনশীল অবস্থা। ঘূর্ণি একটি ভেক্টর রাশি এবং বিভিন্ন স্থানাঙ্ক অক্ষের দিকে এর লম্ব-অভিক্ষেপগুলি হবে যথাক্রমে S_x, S_y ও S_z। S এবং S_z এর পরিমাণ জানা থাকলেই কণাটির ঘূর্ণনশীল অবস্থার পূর্ণ বিবরণ দেওয়া সম্ভব, S_z কোয়াণ্টাম সংখ্যাটিকে পূর্ববর্তী

12·1 সারণী

কণাদের আইসোঘূর্ণি আরোপণ

কণা	I	I_3 এবং বিশেষ I_3 অবস্থার নামকরণ
N	$\frac{1}{2}$	$+\frac{1}{2}$ p $-\frac{1}{2}$ n
Λ	0	0 Λ
Σ	1	$+1$ Σ^+ 0 Σ^0 -1 Σ^-
Ξ	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$ Ξ^0 $-\frac{1}{2}$ Ξ^-
π	1	$+1$ π^+ 0 π^0 -1 π^-
K	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$ K^+ $-\frac{1}{2}$ K^0
$\bar{K}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$ $\overline{K^0}$ $-\frac{1}{2}$ K^-

অধ্যায়গুলিতে m নামে অভিহিত করা হয়েছে। কিন্তু আইসোঘূর্ণের সঙ্গে সাধারণ ত্রিমাত্রিক দেশের কোন সম্পর্ক নেই, তবে একে এক কাল্পনিক ত্রিমাত্রিক দেশের ভিতর ঘূর্ণন হিসাবে কল্পনা করা যেতে পারে, ঐ কাল্পনিক দেশের তিনটি স্থানাঙ্ক অক্ষের দিকে এর অভিক্ষেপগুলি যথাক্রমে I_1, I_2, ও I_3 নামে চিহ্নিত করা হয়। I এবং "3" অক্ষের দিকে এর অভিক্ষেপ I_3 জানা থাকলেই একটি কণার আইসোঘূর্ণ অবস্থার সম্পূর্ণ বিবরণ দেওয়া যায়। নির্দিষ্ট I এর জন্য I_3, $2I+1$ সংখ্যক বিভিন্ন পরিমাণের হতে পারে এবং প্রতিটি I_3 মান কণাটির এক একটি বিভিন্ন আহিত অবস্থাকে নির্দেশ করে। কেন্দ্রকণার ক্ষেত্রে $I=\frac{1}{2}$, এখানে $I_3=\frac{1}{2}$ প্রোটন এবং $I_3=-\frac{1}{2}$ নিউট্রন অবস্থাকে নির্দেশ করে। পাইমেসনের আইসোঘূর্ণের পরিমাণ $I=1$ এবং আইসোঘূর্ণের তিনটি অভিক্ষেপ হ'ল যথাক্রমে π^+, π^0 এবং π^- মেসন। বিভিন্ন কণার আইসোঘূর্ণ এবং I_3 অভিক্ষেপের পরিচয় 12·1 সারণীতে দেওয়া হয়েছে।

বিভিন্ন পরিক্রিয়ার বিষয় পরে আমরা সংক্ষেপে বর্ণনা করব। কেন্দ্রীনের অভ্যন্তরস্থ তীব্র আকর্ষণী বল যে পরিক্রিয়ার অন্তর্গত তাকে বলা হয় বিক্রমশীল পরিক্রিয়া এবং আইসোঘূর্ণ এই বিক্রমশীল পরিক্রিয়ারই একটি বিশেষ ধর্ম। মিউমেসন, ইলেকট্রন এবং পজিট্রনের ক্ষেত্রে আইসোঘূর্ণের ধারণা প্রযুক্ত হয় না, তার কারণ এরা বিক্রমশীল পরিক্রিয়ার কোন অংশগ্রহণ করে না। বিক্রমশীল পরিক্রিয়ায় আইসোঘূর্ণ সংরক্ষিত হয়, এই নীতিটিকে একটু অন্যভাবে বিক্রমশীল পরিক্রিয়ার আধান নিরপেক্ষতা আখ্যা দেওয়া হয়। এই নীতির বক্তব্য হ'ল যে দুটি প্রোটনের মধ্যে কিংবা দুটি নিউট্রনের মধ্যে অথবা একটি প্রোটন ও একটি নিউট্রনের মধ্যে যে বল ক্রিয়া করে তাদের তেজ এবং প্রকৃতি অভিন্ন। অবশ্য pp ও np পরিক্রিয়া সম্পূর্ণ আধান নিরপেক্ষ হতে পারে না, এর কারণ কুলম্ব বলের অবস্থিতি যা প্রোটন ও নিউট্রনের উপর ভিন্নভাবে ক্রিয়া করে। তবে কুলম্ব বলের তেজ কেন্দ্রীনের বলের তুলনায় বহুগুণ কম এবং এর প্রভাব মোটামুটি একটি ক্ষুদ্র শুদ্ধীকরণ রাশি হিসাবে আবির্ভূত হয়। কুলম্ব বলের প্রভাব পৃথক ক'রে ফেলতে পারলে বাকি যে পরিক্রিয়া ঘটে তা আধান নিরপেক্ষতা মেনে চলে। নানারকম বিক্ষুরণের পরীক্ষায় এই মন্তব্যের যথার্থতা প্রমাণিত হয়েছে। আধুনিক ধারণা অনুযায়ী বিক্রমশীল পরিক্রিয়ায় অংশগ্রহণকারী কণাগুলি এই পরিক্রিয়ার মাধ্যমেই সৃষ্টি হয় এবং দেখান যায় যে এই পরিক্রিয়ায় আইসোঘূর্ণ সংরক্ষিত হলে একই I কিন্তু বিভিন্ন I_3 বিশিষ্ট

কণাগুলির ভর হবে পরস্পর সমান। কিন্তু বাস্তবক্ষেত্রে অনেকসময়ই তা হয় না, যেমন π^+ ও π^0 মেসনের ভিতর সামান্য ভরের পার্থক্য আছে এবং নিউট্রনও প্রোটনের তুলনায় সামান্য ভারী। অবশ্য এই ভরব্যবধানের পরিমাণ কণাগুলির ভরের তুলনায় খুবই কম এজন্য অনেকক্ষেত্রেই এই ভরব্যবধান অবহেলা করা যায় এবং বলা যায় যে আইসোঘূর্ণ মোটামুটি সংরক্ষিত হচ্ছে। এই ভরব্যবধান সৃষ্টি হয় মূলতঃ বিদ্যুচ্চুম্বকীয় পরিক্রিয়ার ফলে, বিভিন্ন আইসোঘূর্ণ অভিক্ষেপ সমন্বিত কণাগুলির আধান পৃথক হওয়ায় এদের বিদ্যুচ্চুম্বকীয় শক্তির পরিমাণ পৃথক হয় এবং তার ফলেই এদের ভিতর সামান্য ভরের পার্থক্য সৃষ্টি হয়। I_3 একটি যোজনশীল কোয়াণ্টাম সংখ্যা, অর্থাৎ কোন বিক্রিয়ায় যদি I_3 সংরক্ষিত হয় তবে বিক্রিয়ার ডান ও বাম দিকের কণাগুলির I_3 কোয়াণ্টাম সংখ্যার যোগফল হবে পরস্পর সমান। আইসোঘূর্ণ ভেক্টর I এর যোগকরণ হয় অবিকল কৌণিক ভরবেগ J-এর মত (5·7 সূত্র)।

অস্বাভাবিকতা কোয়াণ্টাম সংখ্যা (Strangeness quantum number)

কণাজগতে অস্বাভাবিকতা কোয়াণ্টাম সংখ্যা নামে আরও একটি কোয়াণ্টাম সংখ্যার অস্তিত্ব আছে। এটি বিশেষভাবে K, Λ, Σ ইত্যাদি কণাগুলির সঙ্গে জড়িত। নিউট্রন, প্রোটন ও পাইমেসনের অস্বাভাবিকতা কোয়াণ্টাম সংখ্যা শূন্য। মৌলিক কণাঘটিত বিভিন্ন বিক্রিয়ার ভিতর কতগুলি বৈচিত্র্য লক্ষ্য ক'রে সর্বপ্রথম এই কোয়াণ্টাম সংখ্যাটির অস্তিত্বের সন্ধান পাওয়া যায়। আমরা এর আগে কতগুলি বিক্রিয়ার বিষয়ে উল্লেখ করেছি যেগুলিতে K-মেসন উৎপন্ন হয়। এরকম আরও কয়েকটি বিক্রিয়া হ'ল

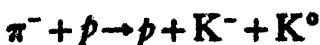
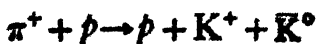
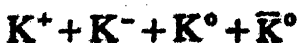
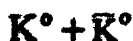
$$\pi^+ + p \rightarrow p + K^+ + \bar{K}^0$$

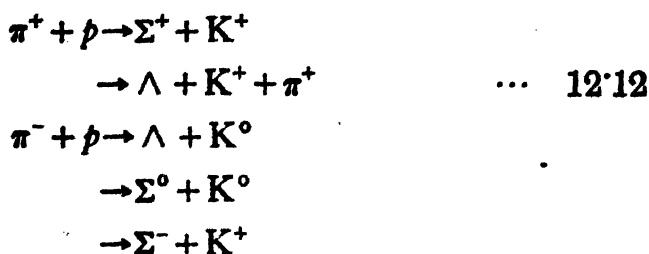
$$\pi^- + p \rightarrow p + K^- + K^0$$

$$p + \bar{p} \rightarrow K^+ + K^- \qquad \cdots \quad 12{\cdot}11$$

$$K^0 + \bar{K}^0$$

$$K^+ + K^- + K^0 + \bar{K}^0$$

$$K^+ + K^- + \pi^+ + \pi^-, \text{ ইত্যাদি}$$

এখানে $\bar{p}$ প্রতীপ প্রোটনকে নির্দেশ করে, এরকম আরও কয়েকটি উল্লেখযোগ্য বিক্রিয়া হ'ল

$$\pi^+ + p \rightarrow \Sigma^+ + K^+$$
$$\rightarrow \Lambda + K^+ + \pi^+ \qquad \cdots \quad 12{\cdot}12$$
$$\pi^- + p \rightarrow \Lambda + K^0$$
$$\rightarrow \Sigma^0 + K^0$$
$$\rightarrow \Sigma^- + K^+$$

12·10 এবং 12·11 বিক্রিয়াগুলি থেকে দেখা যাচ্ছে যে এসব ক্ষেত্রে K-মেসনগুলি জোড়ায় জোড়ায় উৎপন্ন হচ্ছে, আরও লক্ষ্য করা যায় যে K-মেসনগুলি ঐসব বিক্রিয়ায় কেন্দ্রকণা অথবা পাইমেসনের সঙ্গে উৎপন্ন হয়। কিন্তু 12·8 এবং 12·12 বিক্রিয়াগুলিতে যেখানে K-মেসন একটিমাত্র Λ অথবা Σ কণার সঙ্গে উৎপন্ন হয় সেখানে সবসময়ই এদেরকে এককভাবে (অথবা অন্ততঃ বিজোড় সংখ্যায়) উৎপন্ন হতে দেখা যায়। K-মেসন উৎপাদনের এই নিয়মগুলির কখনও ব্যতিক্রম হয় না। এইসব বিক্রিয়া বুদ্‌বুদকক্ষের ভিতর ঘটতে দেখা যায় এবং এদের প্রস্থচ্ছেদও সহজেই মাপা সম্ভব। এই ধরণের বিভিন্ন বিক্রিয়া পর্যালোচনা ক'রে K-মেসন এবং Σ, Λ, Ξ ইত্যাদি ব্যারিয়নগুলির প্রকৃতি সম্বন্ধে নূতনভাবে আলোকপাত করা সম্ভব হয়েছে এবং এর প্রত্যক্ষ ফল হ'ল অস্বাভাবিকতা কোয়ান্টাম সংখ্যার আবিষ্কার। উপরোক্ত বিক্রিয়াগুলির এই বৈচিত্র্য ব্যাখ্যা করা যায় যদি এই কণাগুলির মধ্যে নূতন একটি কোয়ান্টাম সংখ্যার অস্তিত্ব স্বীকার ক'রে নেওয়া হয় এবং 12·7, 12·8, 12·10, 12·11 এবং 12·12 বিক্রিয়াগুলিতে এই নূতন কোয়ান্টাম সংখ্যাটি সংরক্ষিত হওয়া প্রয়োজন। কণাগুলির আপাত-অস্বাভাবিক ব্যবহারহেতু এই নূতন কোয়ান্টাম সংখ্যাটির নামকরণ করা হয়েছে অস্বাভাবিকতা কোয়ান্টাম সংখ্যা, সাধারণতঃ এই কোয়ান্টাম সংখ্যাটিকে S দ্বারা চিহ্নিত করা হয়, S এর পরিমাণ 0, 1, −1, −2, ইত্যাদি হতে দেখা যায়। বিভিন্ন প্রকারের বিক্রিয়া লক্ষ্য ক'রে বিভিন্ন কণার ক্ষেত্রে অস্বাভাবিকতা কোয়ান্টাম সংখ্যার আরোপণ দ্ব্যর্থহীনভাবে নির্দেশ করা সম্ভব, পরপৃষ্ঠার সারণীতে বিভিন্ন কণার S কোয়ান্টাম সংখ্যার আরোপণ প্রকাশ করা হয়েছে, একটি কণার ক্ষেত্রে এর প্রত্যেক আইসোস্পিন অভিক্ষেপের অস্বাভাবিকতা কোয়ান্টাম সংখ্যা পরস্পর সমান। যেসব কণায় এই অস্বাভাবিকতা ধর্ম বর্তমান তাদের বলা হয় অস্বাভাবিক কণা, অস্বাভাবিকতা

12·2 সারণী

কণা	অস্বাভাবিকতা কোয়ান্টাম সংখ্যা
K^+, K^0	$S=+1$
$K^-, \bar{K}^0$	$S=-1$
Λ^0	$S=-1$
$\Sigma^+, \Sigma^0, \Sigma^-$	$S=-1$
Ξ^-, Ξ^0	$S=-2$
n, p	$S=0$
π^+, π^0, π^-	$S=0$

বিক্রমশীল পরিক্রিয়ার একটি বিশেষ ধর্ম এবং এই পরিক্রিয়ায় অস্বাভাবিকতা সংরক্ষিত হয়। μ-মেসন, ইলেকট্রন, নিউট্রিনো অথবা আলোককণা বিক্রমশীল পরিক্রিয়ায় অংশগ্রহণ করে না, এজন্য এদের উপর অস্বাভাবিকতা ধর্ম প্রযুক্ত হয় না। S একটি যোজনশীল কোয়ান্টাম সংখ্যা অর্থাৎ এটি সাধারণ সংখ্যার মতই যোগবিয়োগ হয় এবং এটি সংরক্ষিত হতে হলে প্রত্যেক বিক্রিয়াতেই বিক্রিয়ার বামদিকের কণাগুলির অস্বাভাবিকতা কোয়ান্টাম সংখ্যার যোগফল ডানদিকের কণাগুলির ঐ যোগফলের সমান হতে হবে। পূর্বে যে বিক্রিয়াগুলি আমরা উল্লেখ করেছি তাদের ক্ষেত্রে বাঁদিকের কণাগুলির S এর যোগফল শূন্য (প্রতীপ প্রোটনের $S=0$)। সুতরাং ডানদিকের যোগফলও শূন্য হতে হবে। উপরিলিখিত তালিকার পরিমাণগুলি ব্যবহার করলে সহজেই দেখা যায় যে ঐ বিক্রিয়াগুলিতে বিক্রিয়াজাত কণাগুলির অস্বাভাবিকতা কোয়ান্টাম সংখ্যার যোগফল প্রতিক্ষেত্রে বাস্তবিকই শূন্য। সুতরাং ঐ বিক্রিয়াগুলিতে অস্বাভাবিকতা সংরক্ষিত হয়। এথেকে বোঝা যায় যে K-মেসনগুলি কেন 12·11 বিক্রিয়ায় সর্বদা জোড়ায় জোড়ায় উৎপন্ন হয়, কারণ তা না হলে ঐসব ক্ষেত্রে অস্বাভাবিকতা সংরক্ষিত হতে পারত না। বিভিন্ন উৎপাদন বিক্রিয়ায় দেখা যায় যে পাইমেসন, প্রোটন অথবা নিউট্রনের সঙ্গে জোড় অথবা বিজোড় যেকোন সংখ্যায় উৎপন্ন হতে পারে, এথেকে এই কণাগুলির অস্বাভাবিকতা যে শূন্য এই আরোপণের যথার্থতা প্রতিপন্ন হয়। মার্কিন বিজ্ঞানিদ্বয় গেলমান এবং পাইস এবং জাপানী বিজ্ঞানী নিশিজিমা, এঁদের গবেষণার দ্বারা বিভিন্ন কণায় অস্বাভাবিকতা ধর্ম প্রতিষ্ঠিত হয়েছে। অস্বাভাবিকতা কোয়ান্টাম সংখ্যার অস্তিত্ব এবং সংরক্ষণের জন্যই পরীক্ষাগারে

পাইমেসনের তুলনায় K-মেসন উৎপাদন করা অপেক্ষাকৃত অনেক কঠিন। সাধারণতঃ কোন একটি অস্বাভাবিক কণার দ্বারা বিক্রিয়া ঘটিয়ে অপর একটি অস্বাভাবিক কণা অপেক্ষাকৃত সহজে উৎপন্ন করা যায়। তবে উল্লেখ করা বাহুল্য যে কতগুলি ক্ষরণ প্রক্রিয়া আছে যাদের ভিতর অস্বাভাবিকতা সংরক্ষিত হয় না, পরিশিষ্টের সারণীতে বিভিন্ন অস্বাভাবিক কণার ক্ষরণের বিভিন্ন "ধরণের" তালিকা দেওয়া হয়েছে, লক্ষ্য করলেই দেখা যাবে যে এদের একটির মধ্যেও অস্বাভাবিকতা সংরক্ষিত হয় না।

ব্যারিয়ন সংখ্যা (Baryon number)

ব্যারিয়ন সংরক্ষণ নীতির বিষয়ে পূর্বে কিছু বলা হয়েছে, এই সংরক্ষণ নীতির উপর ভিত্তি ক'রে কণাজগতে আরও একটি নূতন কোয়াণ্টাম সংখ্যার প্রয়োগ হয়েছে, একে বলা হয় ব্যারিয়ন সংখ্যা। প্রতিটি ব্যারিয়নের উপরই একটি ব্যারিয়ন সংখ্যা আরোপ করা হয় এমনভাবে যাতে যাবতীয় বিক্রিয়ার এবং ক্ষরণে এই সংখ্যা সংরক্ষিত হয়। প্রোটন, নিউট্রন, Σ, Λ এবং Ξ কণার প্রত্যেকেরই ব্যারিয়ন সংখ্যা এক, ডয়টেরনের ব্যারিয়ন সংখ্যা দুই, ইত্যাদি। যাবতীয় মেসনের ব্যারিয়ন সংখ্যা একটি যোজনশীল কোয়াণ্টাম সংখ্যা অর্থাৎ যেকোন ক্ষরণ বা বিক্রিয়ার বাম এবং ডান দিকের ব্যারিয়ন সংখ্যার যোগফল পরস্পর অভিন্ন, কণাজগতের এই সংরক্ষণ নীতিটি কেন্দ্রীনঘটিত বিক্রিয়ার কেন্দ্রকণা সংরক্ষণ নীতির সমতুল্য। উপরোক্ত ব্যারিয়ন সংখ্যা আরোপণ মেনে নিলে সহজেই দেখা যায় যে এপর্যন্ত মৌলিককণার যতগুলি বিক্রিয়া ও ক্ষরণের নিদর্শন দেওয়া হয়েছে সেইসব প্রতিক্ষেত্রেই ব্যারিয়ন সংখ্যা সংরক্ষিত হয়। এই সংরক্ষণ নীতি বস্তুজগতের স্থিতিশীলতার পক্ষে একটি অত্যন্ত গুরুত্বপূর্ণ নীতি, বস্তুজগতের স্থায়িত্বের মূল কারণ হ'ল যে প্রোটন একটি সম্পূর্ণ স্থিতিশীল কণা। ব্যারিয়ন সংখ্যা সংরক্ষণ নীতি যাচাই করার জন্য প্রোটনের অর্দ্ধজীবনকাল মাপার চেষ্টা হয়েছে, নানা পরীক্ষায় প্রোটনের অর্দ্ধজীবনকালের যে অধস্তম সীমা সম্বন্ধে জানা গেছে তা হ'ল 10^{23} বছর। ব্যারিয়ন সংখ্যাকে B নামে চিহ্নিত করা হবে।

প্রতীপকণা (Antiparticle)

কণাদের যেসব কোয়াণ্টাম সংখ্যা আছে প্রতীপকণাদের মধ্যেও সেইসমস্ত কোয়াণ্টাম অস্তিত্ব আছে, যদিও উভয়ক্ষেত্রে এদের আরোপণ পৃথক। প্রতীপ-কণাদের ক্ষেত্রে বিভিন্ন কোয়াণ্টাম সংখ্যার সঠিক আরোপণ সমান গুরুত্বপূর্ণ এবং যে পদ্ধতিতে কণাদের ক্ষেত্রে কোয়াণ্টাম সংখ্যাগুলি আরোপ করা হয়

ঠিক সেই একই পদ্ধতিতে প্রতীপকণাদের কোয়াণ্টাম সংখ্যাও নির্দেশ করা যায়, অর্থাৎ প্রতীপকণা-সংশ্লিষ্ট বিভিন্ন বিক্রিয়াগুলি পর্যবেক্ষণ ক'রে। খুব সংক্ষেপে প্রতীপকণাদের কোয়াণ্টাম সংখ্যাগুলি নিরূপণের নীতিটি নিম্নলিখিতভাবে লেখা যায়

$$Q, B, S, I, I_3 \qquad\qquad -Q, -B, -S, I, -I_3$$

Q হ'ল কণার আধান, ইলেকট্রনের আধান e-এর এককে। B, S এবং I_3 কণাটির অপরাপর বিভিন্ন কোয়াণ্টাম সংখ্যাগুলির পরিমাণ, পূর্ববর্তী পরিচ্ছেদ-সমূহে এগুলির বিবরণ দেওয়া হয়েছে; I, কণাটির আইসোস্পিনের পরিমাণ। সুতরাং একটি কণার তুলনায় এর প্রতীপকণার ক্ষেত্রে সমস্ত সাধারণ যোজনশীল কোয়াণ্টাম সংখ্যাগুলি বিপরীত চিহ্ন প্রাপ্ত হয়। উপরিলিখিত নিয়মানুযায়ী $\bar{\Xi}^-$ কণার (Ξ^- এর প্রতীপকণা) বিভিন্ন কোয়াণ্টাম সংখ্যার আরোপণ হবে নিম্নরূপ

$$\bar{\Xi}^- : Q = +1, B = -1, S = 2, I = \tfrac{1}{2}, I_3 = \tfrac{1}{2}$$

একটি উদাহরণের দ্বারা এই আরোপণের যথার্থতা উপলব্ধি করা যেতে পারে; নিম্নলিখিত বিক্রিয়াগুলি ঘটতে দেখা যায়

$$\begin{aligned} p + \bar{p} &\rightarrow \pi^+ + \pi^- \qquad \cdots \qquad 12{\cdot}13 \\ &\rightarrow K^+ + K^- \end{aligned}$$

আধান এবং ব্যারিয়ন সংখ্যার সংরক্ষণ সর্বজনীন, যেকোন বিক্রিয়া যা করলেই এগুলি সংরক্ষিত হয়, কিন্তু 12·13 বিক্রিয়াগুলি ঘটছে বিক্রমশীল পরিক্রিয়ার দ্বারা, এই পরিক্রিয়ায় আইসোস্পিন এবং অস্বাভাবিকতাও সংরক্ষিত হয়। উভয় বিক্রিয়ার ক্ষেত্রেই ডানদিকের কণাগুলির মোট ব্যারিয়ন সংখ্যা, মোট I_3, মোট S এবং মোট আধানের পরিমাণ শূন্য, সুতরাং বাঁদিকের কণাগুলির ক্ষেত্রেও তাই হবে। অর্থাৎ $\bar{p}$ কণার ক্ষেত্রে, এর বিভিন্ন কোয়াণ্টাম সংখ্যার যে আরোপণ উপরে নির্দেশ করা হয়েছে তা যথার্থ। নিম্নলিখিত বিক্রিয়াগুলি ঘটে

$$\begin{aligned} p + \bar{p} &\rightarrow \Sigma^+ + \bar{\Sigma}^+ \qquad \cdots \qquad 12{\cdot}14 \\ &\rightarrow \Lambda + \bar{\Lambda} \end{aligned}$$

এবং এথেকে বোঝা যায় যে প্রতীপকণাদ্বয় $\bar{\Sigma}^+$ এবং $\bar{\Lambda}$ এর জন্যও উপরি-নির্দেশিত কোয়াণ্টাম সংখ্যার আরোপণ যথার্থ। যেকোন কণার ক্ষেত্রেই এর

কোয়ান্টাম সংখ্যাগুলি নির্দ্ধারণের জন্য বিক্রমশীল পরিক্রিয়ায় অংশগ্রহণকালে এর প্রকৃতি অনুধাবন করাই সুবিধাজনক, কারণ অন্যান্য পরিক্রিয়াতে সমস্ত কোয়ান্টাম সংখ্যাগুলি সংরক্ষিত হয় না। প্রতীপ প্রোটনের কোয়ান্টাম-সংখ্যাগুলির উপরোক্ত আরোপণ থেকে সিদ্ধান্ত করা যায় যে নিম্নলিখিত বিক্রিয়ায় প্রতীপ প্রোটন উৎপন্ন হতে পারে

$$p+p \rightarrow p+p+p+\bar{p}$$

স্পষ্টতঃই এক্ষেত্রে, B, Q, S, I_3 সমস্তই সংরক্ষিত হতে পারে। এই বিক্রিয়ার সাহায্যেই প্রথম গবেষণাগারে প্রতীপ প্রোটন উৎপন্ন করা হয়েছে। এই বিক্রিয়ার উদ্‌ঘাটন শক্তি 5650 এমইভি।

মেসনদের ক্ষেত্রে, এদের বিভিন্ন কণার বিভিন্ন কোয়ান্টাম সংখ্যার আরোপণ লক্ষ্য করলে দেখা যায় যে π^+ ও π^- পরস্পরের প্রতীপকণা, তেমনি K° ও $\bar{K}^\circ$ এবং K^+ ও K^- পরস্পর পরস্পরের প্রতীপকণা। মেসনদের ভিতর কখনও কখনও কণা এবং প্রতীপকণা পরস্পর অভিন্ন হতে পারে, একটি উদাহরণ হ'ল π°-মেসন। ব্যারিয়নদের ক্ষেত্রে কিন্তু তা হবার উপায় নেই, কারণ এগুলির ক্ষেত্রে কণা ও প্রতীপকণা দুই সম্পূর্ণ ভিন্ন গোষ্ঠীর অন্তর্ভুক্ত, যা এই দুই গোষ্ঠীর ভিতর পার্থক্যের সৃষ্টি করে তা হ'ল ব্যারিয়ন সংখ্যা। তবে সমস্ত ক্ষেত্রেই কণা এবং প্রতীপকণার ভর (এবং ক্ষরণশীল হলে এদের গড় জীবনকাল) পরস্পর সমান।

গেলম্যান-নিশিজিমা (Gellmann-Nishizima) সূত্র

আমরা মৌলিককণাদের কতগুলি নূতন নূতন ধর্ম্ম যেমন আইসোঘূর্ণ, অস্বাভাবিকতা ও ব্যারিয়ন সংখ্যার বিষয় কিছু আলোচনা করেছি। এই ধর্ম্মগুলি কতগুলি নূতন কোয়ান্টাম সংখ্যার সাহায্যে বিশ্লেষণ করা যায়, ঐ কোয়ান্টাম সংখ্যাগুলি কিভাবে আরোপ করা যায় সেবিষয়েও আলোচনা করা হয়েছে। বিক্রমশীল পরিক্রিয়ায় অংশগ্রহণকারী প্রতিটি কণার মধ্যেই উপরোক্ত প্রত্যেকটি কোয়ান্টাম সংখ্যার অস্তিত্ব আছে। কণাগুলির এইসব ধর্ম্ম ও কোয়ান্টাম সংখ্যাগুলির আবিষ্কার এদের প্রকৃতির রহস্য নির্দ্ধারণের ক্ষেত্রে যুগান্তকারী পদক্ষেপ হিসাবে গণ্য হবার যোগ্য। এরপর শীঘ্রই আবিষ্কৃত হ'ল যে প্রত্যেকটি কণার ক্ষেত্রেই এর ঐসকল বিভিন্ন কোয়ান্টাম সংখ্যা এবং আধানের মধ্যে একটি সহজ সম্বন্ধ আছে, এই সম্বন্ধটি নিম্নলিখিত সূত্রের দ্বারা প্রকাশিত

$$Q = I_3 + \frac{B}{2} + \frac{S}{2} \qquad \cdots \qquad 12{\cdot}15$$

এই সূত্রে যথারীতি Q, B, S এবং I_3 হ'ল যথাক্রমে কণাটির ব্যারিয়ন সংখ্যা, অদ্ভুতাবিকতা ও I_3 কোয়ান্টাম সংখ্যা। বিক্রমশীল পরিক্রিয়ার অংশগ্রহণকারী প্রত্যেকটি কণার বিভিন্ন কোয়ান্টাম সংখ্যাগুলি এবং আধান এমন হতে হবে যেন এদের মধ্যে 12·15 সম্বন্ধটি পালিত হয়, সুতরাং সম্বন্ধটি ব্যারিয়ন এবং মেসন উভয়ের পক্ষেই প্রযোজ্য। উদাহরণ হিসাবে কতগুলি কণা এবং এদের বিভিন্ন কোয়ান্টাম সংখ্যাগুলি সম্বন্ধে উল্লেখ করা যায়

$$\pi^- : Q=-1, I_3=-1, S=0, B=0$$
$$\bar{K}^\circ : Q=0, I_3=\tfrac{1}{2}, S=-1, B=0$$
$$\Sigma^- : Q=-1, I_3=-1, S=-1, B=1$$

কোয়ান্টাম সংখ্যার এই আরোপণগুলি ব্যবহার করলে দেখা যায় যে এই প্রত্যেকটি কণার ক্ষেত্রেই 12·15 সম্বন্ধটি পালিত হয়। আমরা যদি লিখি $Y=B+S$ তবে এই সম্বন্ধটি দাঁড়ায়

$$Q=I_3+Y/2 \qquad \cdots \qquad 12{\cdot}16$$

Y-কে বলা হয় পরাধান (hypercharge), প্রোটনের পরাধান এক, Λ কণা ও পাইমেসনের শূন্য, ইত্যাদি। 12·15 সূত্রটিকে বলা হয় গেলমান-নিশিজিমা সূত্র, এর উদ্ভাবকদের নামানুসারে। লক্ষণীয় যে এই সূত্রটির ভিতর যোজনশীল কোয়ান্টাম সংখ্যাগুলিই শুধু আবির্ভূত হচ্ছে, প্রতীপকণাদের ক্ষেত্রে Q-সহ এই কোয়ান্টাম সংখ্যাগুলির প্রত্যেকটিই বিপরীত চিহ্ন প্রাপ্ত হয় সুতরাং সম্বন্ধটি প্রতীপকণার ক্ষেত্রেও সমান সত্য। মৌলিককণাজগতের ঘটনাবলীর বিশ্লেষণে এই সূত্রটির গুরুত্ব অপরিসীম।

বিভিন্ন পরিক্রিয়া এবং সংরক্ষণ রীতি

মৌলিককণাদের বিষয়ে বিচার করতে হলে বিভিন্ন ধরণের পরিক্রিয়া সম্বন্ধে বিস্তৃত জ্ঞান থাকা প্রয়োজন। এর কারণ, মৌলিককণাদের যাবতীয় ধর্মাবলী এইসব পরিক্রিয়ার দ্বারাই প্রতিভাত হয় এবং নিঃসন্দেহেই বলা যায় যে বিভিন্ন পরিক্রিয়ার প্রকৃতির সঙ্গে কণাগুলির ধর্মাবলী অচ্ছেদ্যভাবে জড়িত, যদিও এই জটিল পারস্পরিক সম্বন্ধের বিষয়ে এখনও খুব বেশী জানা যায়নি। জগতে চার রকমের মৌলিক পরিক্রিয়া দৃষ্ট হয়, এগুলি হ'ল

(1) মহাকর্ষ-ঘটিত পরিক্রিয়া

(2) তড়িচ্চুম্বকীয় পরিক্রিয়া

(3) বিক্রমশীল পরিক্রিয়া (strong interaction)

(4) দুর্ব্বল পরিক্রিয়া (weak interaction)

এদের মধ্যে মহাকর্ষ ও তাড়িচ্চুম্বকীয় পরিক্রিয়াই সর্ব্বাধিক পরিচিত এবং বহুদিন থেকেই বিজ্ঞানীদের জ্ঞাত; বিক্রমশীল ও দুর্ব্বল পরিক্রিয়া সম্বন্ধে জানতে পারা যায় তেজস্ক্রিয়তা ও পরমাণু কেন্দ্রীনের আবিষ্কারের পর। বস্তুতঃ রাদারফোর্ডের পরীক্ষাতেই সর্ব্বপ্রথম জানা গেল যে, কেন্দ্রীনের বলগুলি আকর্ষণী এবং তড়িচ্চুম্বকীয় বলের তুলনায় বহুগুণ বেশী তেজশালী, অতীব তেজশালী বল সৃষ্টি করে ব'লেই পরিক্রিয়াটির নাম বিক্রমশীল পরিক্রিয়া। বিটাক্ষরণ প্রক্রিয়ার বিস্তৃত বিশ্লেষণের দ্বারা সর্ব্বপ্রথম দুর্ব্বল পরিক্রিয়ার অস্তিত্ব জানা যায়। বিক্রমশীল এবং দুর্ব্বল পরিক্রিয়া শুধু পরমাণু কেন্দ্রীন এবং মৌলিক কণাদের মধ্যেই দৃষ্ট হয় এবং একারণেই এই পরিক্রিয়াগুলি এতদিন অজ্ঞাত ছিল। উপরোক্ত চারটি পরিক্রিয়ার মধ্যে সর্ব্বাধিক তেজশালী হ'ল বিক্রমশীল পরিক্রিয়া, তারপরেই তড়িচ্চুম্বকীয় এবং তারপরে দুর্ব্বল পরিক্রিয়া, সর্ব্বশেষে মহাকর্ষ-ঘটিত পরিক্রিয়া। মহাকর্ষের পরিক্রিয়া এতই দুর্ব্বল যে কেন্দ্রীনস্থ কণাগুলির ভিতর এই পরিক্রিয়া-ঘটিত বলের পরিমাণ নির্ণয় করার কোনও উপায় আজ পর্য্যন্ত আবিষ্কৃত হয়নি, সুতরাং কেন্দ্রীন ও কণাজগতে এই বলের কোন প্রভাব নেই ব'লে স্বচ্ছন্দে ধরা যেতে পারে। বিভিন্ন পরিক্রিয়ার তুলনামূলক তেজ পরিমাপ করার একটি প্রকৃষ্ট উপায় হ'ল ঐসব পরিক্রিয়ার দ্বারা যেসব ক্ষরণ ঘটে তাদের জীবনকালের তুলনা করা, এইভাবে তুলনা করলে নিম্নলিখিত রাশিগুলি পাওয়া যায়

পরিক্রিয়া	গড় জীবনকাল
বিক্রমশীল পরিক্রিয়া	$\sim 10^{-23}$ সেকেণ্ড
বিদ্যুচ্চুম্বকীয় পরিক্রিয়া	10^{-16}—10^{-20} সেকেণ্ড
দুর্ব্বল পরিক্রিয়া	$10^{-8} \sim 10^{-10}$ সেকেণ্ড

e আধানবিশিষ্ট দুটি কণা যদি পরস্পরের সঙ্গে বিদ্যুচ্চুম্বকীয় পরিক্রিয়ার সাহায্যে ক্রিয়া করে তবে তাদের মধ্যে বিভবশক্তির পরিমাণ হয়

$$V = e^2/r$$

e^2-কে বলা হয় তাড়িচ্চুম্বকীয় পরিক্রিয়ার আশ্লেষ ধ্রুবক (সাধারণতঃ মাত্রাবিহীন রাশি $\alpha = e^2/\hbar c = \frac{1}{137 \cdot 07}$, একেই আশ্লেষ ধ্রুবক আখ্যা দেওয়া হয়),

প্রত্যেকটি পরিক্রিয়ারই এইরকম এক একটি আশ্লেষ ধ্রুবক আছে এবং কোন পরিক্রিয়ার তেজ মোটামুটিভাবে ঐ পরিক্রিয়ার আশ্লেষ ধ্রুবকের সমানুপাতী হিসাবে ধরা যায়। আবার কোন একটি কণার গড় জীবনকালের পরিমাণ কণাটি যে পরিক্রিয়ার দ্বারা ক্ষরিত হচ্ছে তার আশ্লেষ ধ্রুবকের ব্যস্ত অনুপাতী, এইভাবেই জীবনকালের সঙ্গে তেজের সম্বন্ধ স্থাপিত হয়। তবে জীবনকালের পরিমাণ আরও অনেক কিছুর উপর নির্ভর করে, একমাত্র আশ্লেষ ধ্রুবকের উপর নয়, এজন্য বিভিন্ন কণার ক্ষেত্রে একই পরিক্রিয়ার দ্বারা ক্ষরিত হলেও গড় জীবনকালের মধ্যে ব্যাপক ব্যবধান দেখতে পাওয়া যায়। উপরে বিভিন্ন গড় জীবনকালের যে পরিমাণগুলি দেওয়া হয়েছে সেগুলি শুধু আশ্লেষ ধ্রুবকের পরিমাণের উপর নির্ভর ক'রেই লেখা হয়েছে।

সংরক্ষণ নীতিগুলি একটি পরিক্রিয়ার প্রকৃতিকে বিশেষভাবে প্রভাবিত করে এবং সংরক্ষণ নীতির অস্তিত্ব থেকে পরিক্রিয়াটির প্রকৃতি কি হবে তা অনুধাবন করা যায়। সমস্ত পরিক্রিয়াই পদার্থবিজ্ঞানের কতগুলি সুপ্রসিদ্ধ সংরক্ষণ নীতি যেমন শক্তি সংরক্ষণ, সরল ভরবেগ ও কৌণিক ভরবেগ সংরক্ষণ এবং বৈদ্যুতিক আধান ও ব্যারিয়ন সংখ্যার সংরক্ষণ নীতি মেনে চলে। যেকোন কেন্দ্রীনঘটিত এবং মৌলিক কণাঘটিত বিক্রিয়া বা ক্ষরণ পর্য্যালোচনা করলেই এই সংরক্ষণ নীতিগুলির ক্রিয়াশীলতা প্রদর্শন করা যায়। এর পরেই আসে আইসোস্পিন ও অস্বাভাবিকতা সংরক্ষণ নীতি, দেখা যায় যে সবরকম পরিক্রিয়া এই সংরক্ষণ নীতি দুটি মেনে চলে না, তবে বিক্রমশীল পরিক্রিয়ার যে আইসোস্পিন ও অস্বাভাবিকতা সংরক্ষিত হয় সেসম্বন্ধে আমরা পূর্বে আলোচনা করেছি।

এইবার নিম্নলিখিত ক্ষরণটির কথা ধরা যাক:

$$\Sigma^- \rightarrow n + \pi^-$$

$$I : 1 \quad \tfrac{1}{2} \quad 1$$

$$I_3 : -1 \quad -\tfrac{1}{2} \quad -1$$

কণাগুলির পাশাপাশি এদের I এবং I_3 এর পরিমাণগুলিও লেখা হয়েছে, স্পষ্টই দেখা যাচ্ছে যে, ডানপাশের কণাগুলির I_3 এর যোগফল বাঁপাশের কণাটির I_3 এর সমান নয়। I এর যোগকরণপদ্ধতি অবিকল কৌণিক ভরবেগের যোগকরণ পদ্ধতির মত এবং 5·7 সূত্রটি প্রয়োগ করলে দেখা যায় যে, ডানপাশের মোট I এর পরিমাণ হতে পারে $I=\frac{1}{2}$ অথবা $\frac{3}{2}$, যা বাঁপাশের কণাটির I এর পরিমাণের সঙ্গে মেলে না। সুতরাং এই ক্ষরণের

ক্ষেত্রে I অথবা I_3 কোনটিই সংরক্ষিত হচ্ছে না। এই ক্ষরণটি ঘটতে দেখা যায় (পরিশিষ্ট সারণী), এর গড় জীবনকাল $\sim 10^{-10}$ সেকেণ্ড এবং এটি একটি দুর্বল পরিক্রিয়াজাত ক্ষরণ। সুতরাং দেখা যাচ্ছে যে দুর্বল পরিক্রিয়ায় I এবং I_3 সংরক্ষিত হয় না। শুধু এই একটি ক্ষরণের ক্ষেত্রেই নয়, সমস্ত দুর্বল পরিক্রিয়া-ঘটিত ক্ষরণেই আইসোঘূর্ণি সংরক্ষণের অভাব লক্ষ্য করা যায়। স্পষ্টতঃ, এই ক্ষরণে অস্বাভাবিকতাও সংরক্ষিত হয় না।

যেসমস্ত ক্ষরণে শুধুমাত্র বিক্রমশীল পরিক্রিয়ায় অংশগ্রহণকারী কণাদের আবির্ভাব হয় তাদের ক্ষেত্রে গেলমান-নিশিজিমা সূত্রের সাহায্যে I_3 সংরক্ষণ বা নাশনের প্রকৃতি লক্ষ্য ক'রে তৎক্ষণাৎ S এর সংরক্ষণ এবং নাশনের প্রকৃতি অনুধাবন করা যায়। কারণ ব্যারিয়ন সংখ্যা এবং আধান প্রতিক্ষেত্রেই সংরক্ষিত হয় ($\Delta B, \Delta Q = 0$)। বিক্রমশীল পরিক্রিয়ায় যেহেতু I_3 সংরক্ষিত হয় এজন্য 12·15 সম্বন্ধটি ব্যবহার ক'রে আমরা পাই

$$\Delta I_3 = 0 \rightarrow \Delta S = 0 \quad \cdots \quad 12{\cdot}17$$

'Δ' চিহ্নটির দ্বারা বোঝান হয় কোন একটি বিক্রিয়া বা ক্ষরণে দুদিকে কোন একটি কোয়ান্টাম সংখ্যার যোগফলের মধ্যে যতটা প্রভেদ হয় তার পরিমাণ

$$\Delta I_3 = \Sigma I_3{}' - \Sigma I_3{}^{‘}$$
$$\Delta S = \Sigma S' - \Sigma S^{‘}$$

দুর্বল পরিক্রিয়া-ঘটিত ক্ষরণে কখনও দেখা যায় $\Delta S = +1$, কখনও -1। $\Sigma^- \rightarrow n\pi^-$ ক্ষরণটি $\Delta S = +1$ প্রক্রিয়ার নিদর্শন। $\Delta S = -1$ ক্ষরণের নিদর্শন হিসাবে নিম্নলিখিত ক্ষরণটি উল্লেখ করা যায়ঃ

$$K^+ \rightarrow \pi^+ + \pi^0$$

সুতরাং গেলমান-নিশিজিমা সূত্র প্রয়োগ ক'রে এইসব দুর্বল ক্ষরণ প্রক্রিয়াগুলির জন্য আমরা লিখতে পারি

$$\Delta S = \pm 1$$
$$\Delta I_3 \neq 0 \quad \cdots \quad 12{\cdot}18$$

$|\Delta S| = 2$ ক্ষরণ কখনও ঘটতে দেখা যায় না।

আরও একরকমের দুর্বল ক্ষরণ প্রক্রিয়া আছে, যাদের মধ্যে লঘুকণা অর্থাৎ মিউমেসন, ইলেকট্রন, নিউট্রিনো ইত্যাদির আবির্ভাব ঘটে, এদের নিদর্শন হ'ল

$$\pi^{\pm} \rightarrow \mu^{\pm} + \nu$$
$$n \rightarrow p + e^- + \nu \quad \cdots \quad 12{\cdot}19$$
$$K^{\pm} \rightarrow \pi^0 + e^{\pm} + \nu$$

এসব ক্ষেত্রে শুধু বিক্রমশীল পারিক্রিয়ার অংশগ্রহণকারী কণাগুলির উপরই আইসোঘূর্ণি এবং অস্বাভাবিকতা সংরক্ষণের সর্তগুলি প্রয়োগ করতে হবে কারণ লঘুকণাগুলির কোন আইসোঘূর্ণি বা অস্বাভাবিকতা থাকে না। 12·19 উদাহরণে পাইমেসনের ক্ষরণে ডানদিকের কণাগুলির মধ্যে কোন বিক্রমশীল পারিক্রিয়াকারী কণার অস্তিত্বই নেই, অর্থাৎ ডানদিকের সমস্ত কোয়ান্টাম সংখ্যাগুলির মান শূন্য, অতএব এক্ষেত্রে $|\Delta I|=1$, $\Delta I_3=\mp 1$, $\Delta S=0$। দ্বিতীয় ক্ষরণটিতে $\Delta S=0$ এবং $\Delta I_3=+1$ এবং তৃতীয়টির ক্ষেত্রে $\Delta S=\mp 1$, $\Delta I_3=\mp\frac{1}{2}$। এইসব উদাহরণগুলি থেকে দেখা যায় যে দুর্বল পারিক্রিয়ায় আইসোঘূর্ণি এবং অস্বাভাবিকতা উভয় ধর্মই নাশিত হয়।

নিম্নলিখিত বিকিরণাত্মক ক্ষরণ প্রক্রিয়াটি তড়িচ্চুম্বকীয় পারিক্রিয়ার দ্বারা পরিচালিত হয়, এর গড় জীবনকাল প্রায় 10^{-14} সেকেণ্ড

$$
\begin{array}{llll}
 & \Sigma^0 \rightarrow & \Lambda + & \gamma \\
I & :1 & 0 & 0 \\
I_3 & :0 & 0 & 0
\end{array}
$$

আলোককণার ক্ষেত্রে $I=0$, $S=0$ ধরা হয় এবং এই ক্ষরণে স্পষ্টতঃই I_3 সংরক্ষিত হয় কিন্তু I সংরক্ষিত হয় না, সুতরাং তড়িচ্চুম্বকীয় পারিক্রিয়ার সংরক্ষণের নীতি বিক্রমশীল কিংবা দুর্বল পারিক্রিয়ার তুলনায় পৃথক। তবে এই পারিক্রিয়ার অস্বাভাবিকতা সংরক্ষিত হয়, সুতরাং এক্ষেত্রে I_3 সংরক্ষণ আধান সংরক্ষণের সমতুল্য।

এখানে স্বল্পপরিসরে বিভিন্ন পারিক্রিয়ার যাবতীয় ধর্মাবলীর বিস্তৃত পরিচিতি দেওয়া সম্ভব নয়, উপরোক্ত সংরক্ষণ নীতিগুলি ছাড়া কণাজগতে আরও সংরক্ষণ নীতি আছে যেগুলি সমান গুরুত্বপূর্ণ কিন্তু সেগুলির সম্বন্ধে কিছু বলার সুযোগ আমাদের নেই। সর্বাধিক সংরক্ষণ নীতি ক্রিয়াশীল হতে দেখা যায় বিক্রমশীল পারিক্রিয়ার ক্ষেত্রে, তড়িচ্চুম্বকীয় পারিক্রিয়ার অপেক্ষাকৃত কমসংখ্যক সংরক্ষণ নীতি বজায় থাকে, দুর্বল পারিক্রিয়ায় বহুসংখ্যক সংরক্ষণ নীতি নাশিত হতে দেখা যায়। সংরক্ষণ নীতিগুলি ব্যবহার ক'রে বিভিন্ন পারিক্রিয়ার প্রকৃতি অনুধাবন করার চেষ্টা চলছে এবং কণাজগতের আরও নূতন নূতন সংরক্ষণ নীতিরও অনুসন্ধান চলছে। কণাদের সঙ্গে পারিক্রিয়াগুলির সম্বন্ধ অঙ্গাঙ্গিভাবে জড়িত এবং বিভিন্ন ভর ও ধর্মাবলীবিশিষ্ট বহুসংখ্যক কণার অস্তিত্বের কারণ এই পারিক্রিয়াগুলির প্রকৃতির মধ্যেই নিহিত আছে

এরূপ ধারণা খুবই যুক্তিসঙ্গত। যে কণাগুলির বিবরণ আমরা ইতিপূর্বে দিয়েছি সেগুলি ছাড়া আরও অনেক নূতন নূতন কণা আবিষ্কৃত হয়েছে, তবে ঐসব কণার অধিকাংশই বিক্রমশীল পরিক্রিয়ার দ্বারা ক্ষরিত হয়। এদের গড় জীবনকালের পরিমাণ $\sim 10^{-22}$ সেকেণ্ড এজন্য অত্যন্ত জটিল অপ্রত্যক্ষ পদ্ধতির দ্বারা এদের পরীক্ষা করতে হয়, কণাদের ধর্মাবলী নির্দ্ধারণের যেসব পদ্ধতি পূর্বে উল্লেখ করা হয়েছে সেগুলি এইসব কণার ক্ষেত্রে প্রযোজ্য নয়। বিভিন্ন দেশে নূতন নূতন শক্তিশালী ত্বরণযন্ত্র স্থাপিত হতে থাকায় ভবিষ্যতে আরও নূতন নূতন মৌলিককণা আবিষ্কৃত হবার সম্ভাবনা রয়েছে। মৌলিককণাদের উপর গবেষণা অত্যন্ত কঠিন কিন্তু চিত্তাকর্ষক, এইসব গবেষণার দ্বারা বিজ্ঞানীরা ক্রমাগত পদার্থের ভিতর একের পর এক অভাবিতপূর্ব রহস্যের সন্ধান পাচ্ছেন যা বস্তুজগতের স্বরূপ সম্বন্ধে আমাদের ধারণা পরিবর্তিত ক'রে দিচ্ছে।

প্রশ্নমালা

(1) স্থির অবস্থা থেকে পাইমেসনের ক্ষরণ ঘটলে একটি 4·05 এমইভি শক্তিসম্পন্ন মিউমেসন উৎপন্ন হয়। সাথে সাথে যে নিউট্রিনোটি উৎপন্ন হয় তার শক্তি কত? [30·3 এমইভি]

(2) একটি প্রতীপ প্রোটন কোন ফোটোগ্রাফীর অবদ্রবের ভিতর এসে থেমে গিয়ে অবশেষে একটি প্রোটনের সঙ্গে জোড়াবিনাশ প্রক্রিয়ার দ্বারা একজোড়া ধন এবং একজোড়া ঋণ -আহিত পাইমেসন এবং একটি নিরপেক্ষ পাইমেসন উৎপন্ন করে। যদি প্রতিটি মেসন সমান গতিশক্তি নিয়ে উৎপন্ন হয় তবে ঐ শক্তির পরিমাণ কত? [235 এমইভি]

(3) একটি মেঘকক্ষের ভিতর একটি পজিট্রনের পথ 12 সেমি ব্যাসার্দ্ধ সমন্বিত একটি বৃত্তে বেঁকে যেতে দেখা যায় এবং তা ঘটছে 80 গস চৌম্বক-ক্ষেত্রের প্রভাবে। ঐ পজিট্রনের শক্তি কত? [80 কিলোইভি]

(4) সাধারণ হাইড্রোজেনের তুলনায় মিউমেসিক হাইড্রোজেনের পার্থক্য হ'ল এই যে ইলেকট্রনের পরিবর্তে এর কক্ষে থাকে একটি মিউমেসন। মেসিক পরমাণুতে মেসন ও কেন্দ্রীনের মধ্যে প্রথম বোর কক্ষের ক্ষেত্রে দূরত্ব কত হবে নির্ণয় কর। [$2·85 \times 10^{-11}$ সেমি]

(5) মৌলিক হাইড্রোজেন পরমাণুর ক্ষেত্রে রিডবার্গ ধ্রুবক এবং আয়নীভবন শক্তির পরিমাণ নির্ণয় কর।

$$\begin{bmatrix} 2{\cdot}04\times 10^7 \text{ মিটার}^{-1} \\ 2{\cdot}53 \quad \text{কিলোইভি} \end{bmatrix}$$

(6) M_0 ভরবিশিষ্ট একটি কণার স্থির অবস্থা থেকে বিদেহ করণ ঘটছে এবং এর ফলে M_1 ও M_2 ভরবিশিষ্ট দুটি কণা উৎপন্ন হচ্ছে। দেখাও যে প্রথম কণাটির (ভর M_1) গতিশক্তি হবে

$$T_1 = \frac{(M_0 - M_1)^2 + M_2^2}{2M_0}$$

এখানে M_0, M_1, M_2, কণাগুলির আপেক্ষিকতাত্ত্বিক স্থিরশক্তি, এমইভি এককে প্রকাশিত।

সমাধান :

প্রথমে ধরা যাক $\overline{M}_0$, $\overline{M}_1$, ইত্যাদি হ'ল কণাগুলির স্থির ভর, গ্রামে প্রকাশিত। কণাটি করণের পূর্বে স্থির আছে, সুতরাং আমরা এর মোট শক্তির জন্য লিখতে পারি

$$\overline{M}_0^2 c^4 = E_0^2 - p^2 c^2 = E_0^2$$

ধরা যাক, করণোত্তর উদ্ভূত কণাদ্বয়ের শক্তি যথাক্রমে E_1 ও E_2, সুতরাং $E_0 = E_1 + E_2$। ভরবেগ সংরক্ষণ নীতির দরুণ করণোত্তর কণাদ্বয়ের উভয়ের ভরবেগ হবে পরস্পর সমান কিন্তু বিপরীতমুখী

$$\vec{p}_1 + \vec{p}_2 = 0, \quad |p_1| = |p_2| = p$$

সুতরাং প্রথম কণাটির শক্তি হবে

$$E_1^2 = \overline{M}_1^2 c^4 + p^2 c^2 = (\overline{M}_1 c^2)^2 + (pc)^2$$

এই সম্বন্ধটিতে $\overline{M}_1 c^2$ এবং pc উভয় রাশিই শক্তি নির্দেশক, অর্থাৎ এদের মাত্রা শক্তির, সুতরাং এগুলিকে এমইভি এককে মাপা যায়। এই এককে প্রকাশ করলে উপরিলিখিত সম্বন্ধটিকে আমরা নিম্নলিখিত উপায়ে লিখতে পারি

$$E_1^2 = M_1^2 + p^2$$

এই সূত্রে M_1 ও p উভয়েরই শক্তির মাত্রা, M_1 এমইভিতে প্রকাশিত

কণাটির স্থির শক্তি এবং এমইভি-তে প্রকাশিত pc-এর মানকে p হিসাবে লেখা হয়েছে। এক্ষেত্রে একটু সতর্কতা অবলম্বন করা প্রয়োজন কারণ "p" চিহ্নটি সর্বত্রই কণার ভরবেগ নির্দেশ করার জন্যও ব্যবহৃত হয়ে থাকে। বর্তমান অবস্থায় ভরবেগ এমইভি/c এককে প্রকাশিত থাকবে। এই নূতন এককে প্রকাশ করলে এবার আমরা লিখতে পারি

$$M_0^2 = E_0^2 = (E_1 + E_2)^2 = (\sqrt{M_1^2 + p^2} + \sqrt{M_2^2 + p^2})^2$$

$$= M_1^2 + M_2^2 + 2p^2 + 2\sqrt{M_1^2 + p^2}\sqrt{M_2^2 + p^2}$$

এই সম্বন্ধ থেকে সহজেই p^2 এর মান নির্ণয় করা যায়

$$p^2 = \frac{(M_0^2 - M_1^2 - M_2^2)^2 - 4M_1^2M_2^2}{4M_0^2}$$

$$p = \frac{\sqrt{\lambda(M_0^2, M_2^2, M_1^2)}}{2M_0}$$

এবং $\lambda(a, b, c) = a^2 + b^2 + c^2 - 2ab - 2bc - 2ca$; প্রথম কণাটির মোট শক্তির পরিমাণ হবে

$$E_1^2 = M_1^2 + p^2 = \frac{(M_0^2 + M_1^2 - M_2^2)^2}{4M_0^2}$$

$$E_1 = \frac{M_0^2 + M_1^2 - M_2^2}{2M_0}$$

এবং এর মোট গতিশক্তি হবে

$$T_1 = E_1 - M_1 = \frac{(M_0 - M_1)^2 - M_2^2}{2M_0}$$

এই সূত্রগুলিতে T_1, E_1, M_1, ইত্যাদি সবই এমইভি এককে প্রকাশিত।

(7) দেখাও যে একটি কণা যার ভরবেগ $p = 300$ এমইভি/c, এর চৌম্বকদৃঢ়তার পরিমাণ হবে $B\rho = 10^6$ গস-সেমি।

(8) নিম্নলিখিত ক্ষরণ প্রক্রিয়াগুলিতে উদ্ভূত আহিতকণাগুলির গতিশক্তি কত ?

(i) $\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu$, (ii) $K^+ \rightarrow \mu^+ + \nu$, (iii) $\Sigma^+ \rightarrow p + \pi^0$.

[(1) 4·1 এমইভি, (ii) 153 এমইভি, (iii) 18·9 এমইভি]

(9) মিউমেসিক সীসার পরমাণুর ভূমিস্তরে মিউমেসনের কক্ষপথের ব্যাসার্ধ কত হবে ? (সীসার কেন্দ্রীনকে বিন্দুপ্রমাণ আধানের উৎস হিসাবে ধরে নেওয়া যেতে পারে।) [$3{\cdot}47 \times 10^{-13}$ সেমি]

স্নাতকস্তরের উপযোগী
কতগুলি প্রামাণ্য পুস্তকের তালিকা

Atomic spectra and Atomic structure: G. Herzberg, Dover Publication, N. Y., 1944

Introduction to Atomic Physics: O. Oldenberg, Mcgraw Hill Book Co., N. Y.

Introduction to Modern Physics: F. K. Richtmeyer & E. H. Kennard, Mcgraw Hill Book Co., N. Y.

Atoms, Molecules and Quanta: A. E. Ruark & H. C. Urey, Mcgraw Hill Book Co., 1930

Introduction to Atomic and Nuclear Physics: H. Semat, Rinehart & Co., 1946

Introduction to Atomic Spectra: H. E. White, Mcgraw Hill Book Co., 1935

Introduction to Atomic Physics: S. Tolansky, New York : Longmans, Green and Co.

Introductory Atomic Physics : M. R. Wehr & J. A. Richards, Addison-Wesley Publishing Co., 1962

Mechanics—Berkeley Physics course, vol. 1: C. Kittel, W. D. Knight & M. A. Ruderman, Mcgraw Hill Book Co., N. Y.

Electricity and Magnetism—Berkeley Physics course, vol. 2: E. M. Purcell

Introductory Nuclear Physics: D. Halliday, John Wiley & Co.

Electron and Nuclear Physics: J. B. Hoag & S. A. Korff, Van Nostrand Co., 1948

Source book on Atomic Energy: S. Glasstone, Van Nostrand Co., 1950

Nuclear Physics: I. Kaplan, Addison-Wesley, 1955

High Energy Acelerators: M. Stanley Livingston, N. Y. Interscience, 1954

Nuclear Reactor Engineering: S. Glasstone & Alexander Sasonske, Van Nostrand Co., N. Y., 1963

The Atomic Nucleus: Robley D. Evans, Mcgraw Hill Book Co., N. Y., 1955

Newnes Encyclopaedia of Nuclear Energy: George Newnes Limited, London, 1962

High Energy Particles: B. Rossi, Prentice Hall, 1952

Cosmic Rays: B. Rossi, Mcgraw Hill Paperbacks in Physics, 1964

Table of Isotopes : C. M. Leaderer, J. M. Hollander & I. Perlman, John Wiley, Inc.

Fundamentals of Nuclear Physics: Atam P. Arya, Allyn & Bacon, Boston, 1968

Classical Scientific Papers (Physics): Mills & Boon Limited, 50 Grafton Way, London, 1964

পরিশিষ্ট 1

বিভিন্ন ধ্রুবকের সারণী

ধ্রুবকের নাম	চিহ্ন	অনুনাদীকৃত মান (0'° মানক অনুসারে)
আলোর গতিবেগ (শূন্যের ভিতর)	c	$(2{\cdot}997928 \pm 0{\cdot}000004) \times 10^{10}$ সেমি/সেক
ইলেকট্রনের আধান	e	$(4{\cdot}80281 \pm 0{\cdot}00008) \times 10^{-10}$ স্থিরবৈদ্যুতিক একক
ইলেকট্রনের আধান ও ভরের অনুপাত	e/m	$(5{\cdot}27291 \pm 0{\cdot}00008) \times 10^{17}$ স্থিরবৈদ্যুতিক একক/গ্রাম
এ্যাভোগাড্রো সংখ্যা	N_0	$(6{\cdot}0248 \pm 0{\cdot}0002) \times 10^{23}$/গ্রাম অণু
লসমিডের সংখ্যা (অণুর সংখ্যা/সেমি^{3})	n_0	$(2{\cdot}68715 \pm 0{\cdot}00009) \times 10^{19}$/সেমি^{3}
ফ্যারাডে ধ্রুবক	F	(96520 ± 2) কুলম্ব/গ্রাম ইকুইভালেণ্ট
প্ল্যাঙ্কের ধ্রুবক	h	$(6{\cdot}6251 \pm 0{\cdot}0002) \times 10^{-27}$ আর্গ/সেকেণ্ড
বোর চৌম্বক ভ্রামক $(\mu_0 = ch/4\pi mc)$	μ_0	$(0{\cdot}92729 \pm 0{\cdot}00002) \times 10^{-20}$ আর্গ/গস
রিডবার্গ ধ্রুবক (হাইড্রোজেন)	R_H	$(109{,}677{\cdot}58 \pm 0{\cdot}01)$/সেমি
রিডবার্গ ধ্রুবক (অসীম ভর)	R_∞	$(109{,}737{\cdot}31 \pm 0{\cdot}01)$/সেমি
সূক্ষ্মবিভাজন ধ্রুবক $(\alpha = e^2/\hbar c)$	α	$\frac{1}{\alpha} = 137{\cdot}0366 \pm 0{\cdot}0005$
প্রথম বোর ব্যাসার্ধ $\left(r_0 = \frac{h^2}{4\pi^2 me^2}\right)$		$(5{\cdot}29172 \pm 0{\cdot}00002) \times 10^{-9}$ সেমি
বোল্টজ্‌ম্যান ধ্রুবক	k	$(1{\cdot}38046 \pm 0{\cdot}00005) \times 10^{-16}$ আর্গ/ডিগ্রি °K
এক গ্রাম অণুর ঘনায়তন (molar volume)		$(2{\cdot}24208 \pm 0{\cdot}00003) \times 10^{4}$ সেমি^{3}/গ্রাম অণু
ইলেকট্রনের স্থির ভর	m	$(9{\cdot}1085 \pm 0{\cdot}0003) \times 10^{-28}$ গ্রাম
প্রোটনের স্থির ভর	M_p	$(1{\cdot}67239 \pm 0{\cdot}00004) \times 10^{-24}$ গ্রাম
প্রোটন ও ইলেকট্রনের স্থির ভরের অনুপাত		$1836{\cdot}11 \pm 0{\cdot}02$

পরিশিষ্ট 2

নিউট্রনের শ্লথকরণ

একটি নিউট্রন কোন কেন্দ্রীনের সঙ্গে একটি সংঘর্ষে গড়ে যে পরিমাণ শক্তি ক্ষয় করে তা শক্তি ও ভরবেগ সংরক্ষণের নীতি প্রয়োগ ক'রে গণনা করা যায়। গণনার সুবিধার জন্য এই ধরণের সমস্যায় দুইপ্রকার অভিধান কাঠামোর (reference frame) ব্যবহার প্রচলিত, এদের একটির নাম ল্যাবরেটরী কাঠামো (L), অপরটি হ'ল ভরকেন্দ্রের কাঠামো (C)। প্রথমোক্ত কাঠামোটিতে সংঘর্ষের পূর্বে ঘাতবহ কেন্দ্রীনটি স্থির এবং নিউট্রনটি নির্দিষ্ট গতিবেগে এর দিকে এগিয়ে যায়। শেষোক্ত কাঠামোটি নিউট্রন ও ঘাতবহ কেন্দ্রীনের ভরকেন্দ্রের মধ্যে সংবদ্ধ, এই কাঠামোর পরিপ্রেক্ষিতে নিউট্রন এবং কেন্দ্রীন উভয়ই স্ব স্ব নির্দিষ্ট গতিবেগে এদের পরস্পরের ভরকেন্দ্রের দিকে এগিয়ে আসে। ভরকেন্দ্রসংবদ্ধ কাঠামোর পরিপ্রেক্ষিতে বিচার করলে বিচ্ছুরণ প্রক্রিয়াটির বিশ্লেষণ অনেক ক্ষেত্রেই সরলতর হয় এবং এভাবে প্রাপ্ত ফলাফল তারপর সহজেই ল্যাবরেটরী কাঠামোর পরিপ্রেক্ষিতে প্রকাশ করা যায়। বর্তমান বিশ্লেষণে আমরা নিউট্রন ও কেন্দ্রীনের সংঘর্ষকে দুটি বিলিয়ার্ড বলের সংঘর্ষের ন্যায় কল্পনা করব এবং এদের ক্ষেত্রে সনাতন নিউটনীয় বলবিজ্ঞানই প্রয়োগ করা হবে। এই পদ্ধতিই নির্ভুল ফলাফল পাবার পক্ষে যথেষ্ট।

L এবং C কাঠামোদ্বয় থেকে যথাক্রমে সংঘর্ষের প্রকৃতি কিরকম দেখায় তা A·1 চিত্রে বোঝান হয়েছে। L-কাঠামোতে সংঘর্ষের পূর্বে একটি নিউট্রন যার ভর m, E_0 শক্তি এবং mv_0 ভরবেগ নিয়ে একটি ঘাতবহ কেন্দ্রীনের দিকে এগিয়ে যায়। কেন্দ্রীনটির ভর M এবং এটি স্থির এরকম ধ'রে নেওয়া হয়; এক্ষেত্রে এদের ভরকেন্দ্রের গতিবেগ হয়

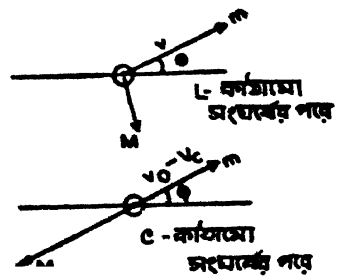
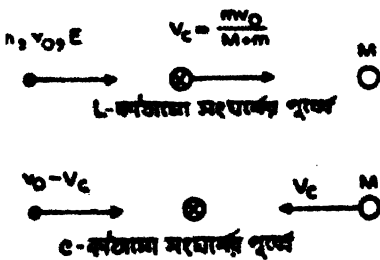
$$V_c = \frac{mv_0}{M+m} \qquad \cdots \qquad A{\cdot}1$$

সংঘর্ষের পরে ধরা যাক নিউট্রনটির শক্তি ও গতিবেগ হয় যথাক্রমে E এবং v এবং এটি এর প্রাথমিক দিকের সঙ্গে θ কোণে নির্গত হয়। কেন্দ্রীনটির সংঘর্ষোত্তর গতিবেগ ধরা যাক v (A·1 চিত্র)। C-কাঠামো থেকে লক্ষ্য করলে, সংঘর্ষের পূর্বে নিউট্রনটি ডানদিকে অগ্রসর হয় এবং গতিবেগ হয়

$$v_0 - V_c = \frac{Mv_0}{M+m} \qquad \cdots \qquad A{\cdot}2$$

এবং যাতবহ কেন্দ্রীনটি V_c গতিবেগ নিয়ে বাঁদিকে অর্থাৎ ভরকেন্দ্রের দিকে এগিয়ে যায়। সুতরাং ভরকেন্দ্রের পরিপ্রেক্ষিতে এদের উভয়ের সম্মিলিত ভরবেগের পরিমাণ হয়

$$m\frac{Mv_o}{M+m}-M\frac{mv_o}{M+m}=0$$

এক্ষেত্রে সংঘর্ষের পর নিউট্রনটি প্রাথমিক গতিপথের দিকের সঙ্গে ϕ কোণে অগ্রসর হয়। যেহেতু ভরবেগ সংরক্ষিত হয়, ভরকেন্দ্রের পরিপ্রেক্ষিতে সংঘর্ষের পূর্বে এবং পরে উভয়ক্ষেত্রেই ঐ দুই কণার ভরবেগের ভেক্টর যোগফলের মান শূন্য থাকবে। সুতরাং সংঘর্ষের পর কেন্দ্রীনটি অবশ্যই আপতিত নিউট্রনের গতিপথের দিকের সঙ্গে $180+\phi$ কোণে নির্গত হবে। C-কাঠামোতে সংঘর্ষের পূর্বে এবং পরে মোট ভরবেগের পরিমাণ শূন্য থাকাতে এটিতে গণনার বিশেষ সুবিধা হয়। এই কাঠামোতে সংঘর্ষের পর দর্শক শুধু কেন্দ্রীন এবং নিউট্রনের গতিপথের দিক পরিবর্তন লক্ষ্য করে। স্থিতিস্থাপক সংঘর্ষে মোট গতিশক্তি সংরক্ষিত হয় এবং C-কাঠামোতে কণাদ্বয়ের বেগ পূর্বের মতই থাকে, কারণ তা না হলে কণাদ্বয়ের মোট গতিশক্তির মধ্যে সংঘর্ষের পূর্বে ও পরে কিছুটা পার্থক্য দেখা দেবে। সুতরাং C-কাঠামোতে মূল প্রতিক্রিয়া হ'ল কণাদ্বয়ের গতিবেগের দিক পরিবর্তন ক'রে দেওয়া, এদের পরস্পরের বেগ অটুট রেখে। L-কাঠামোতে সংঘর্ষের পর উভয় কণার গতিবেগের পরিমিতি (magnitude) পরিবর্তিত হয়ে যায় এবং এরা পরস্পরের বিপরীত দিকেও

চিত্র A·1 : গবেষণার (L) এবং ভরকেন্দ্রের (C) পরিপ্রেক্ষিতে দুটি কণার সংঘর্ষের বিবরণ।

থাকে না। L-কাঠামোতে নিউট্রনটি θ কোণে বিচ্ছুরিত হয় এবং এর গতিবেগ হয় v, যা হ'ল C-কাঠামোতে নিউট্রনের গতিবেগ এবং কণাদ্বয়ের ভরকেন্দ্রের গতিবেগের ভেক্টর যোগফল। এই দুই গতিবেগ যোগকরণের পদ্ধতি A·2 চিত্রে দেখান হয়েছে। এক্ষেত্রে সংঘর্ষোত্তর নিউট্রনের গতিবেগ ϕ এর অপেক্ষক

হিসাবে প্রকাশ করা যায়। A·2 চিত্রটিতে ত্রিকোণমিতির কোসাইন সূত্র প্রয়োগ করলে আমরা পাই

$$v^2 = v_0^2 \left(\frac{M}{M+m}\right)^2 + v_0^2 \left(\frac{m}{M+m}\right)^2 + 2\,v_0^2\,\frac{M}{M+m}\,\frac{m}{M+m}\cos\phi \quad \cdots \quad A\cdot3$$

সুতরাং, সংঘর্ষের পর নিউট্রনের শক্তি E এবং এর সংঘর্ষপূর্ব শক্তি E_0 এর অনুপাত হবে

$$\frac{E}{E_0} = \frac{v^2}{v_0^2} = \frac{M^2 + m^2 + 2Mm\cos\phi}{(M+m)^2} \quad \cdots \quad A\cdot4$$

এই অনুপাতটি আমরা নিম্নে সংজ্ঞায়িত r রাশিটির দ্বারাও প্রকাশ করতে পারি

$$r = \left(\frac{M-m}{M+m}\right)^2 \quad \cdots \quad A\cdot5$$

এর সাহায্যে A·4 সমীকরণটি নিম্নলিখিতভাবে লেখা যায়

$$\frac{E}{E_0} = \frac{1+r}{2} + \frac{1-r}{2}\cos\phi \quad \cdots \quad A\cdot6$$

স্পষ্টতঃই সর্বাধিক শক্তি ক্ষয় হয় যখন $\phi = 180°$ অর্থাৎ $\cos\phi = -1$; এই অবস্থায়

$$\frac{E}{E_0} = \left(\frac{M-m}{M+m}\right)^2 \quad \cdots \quad A\cdot7$$

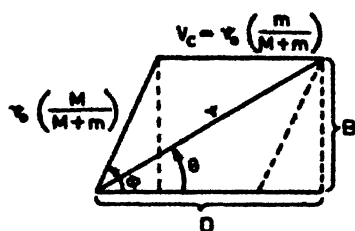
এই অবস্থা নির্দেশ করে মুখোমুখি সংঘর্ষ অর্থাৎ সংঘর্ষের পর নিউট্রনটি ঠিক বিপরীত দিকে নিক্ষিপ্ত হয়। যদি ভারী জল হ্রাসক হিসাবে ব্যবহৃত হয় তাহলে ডিউটেরনের সঙ্গে একটি মুখোমুখি সংঘর্ষে শক্তিক্ষয়ের পরিমাণ হবে

$$\frac{E}{E_0} = \left(\frac{2-1}{2+1}\right)^2 = \frac{1}{9} = \cdot11$$

অর্থাৎ এক্ষেত্রে মুখোমুখি সংঘর্ষে একটি নিউট্রন প্রায় এর 89% শক্তি ক্ষয় ক'রে ফ্যালে। সবচেয়ে কম শক্তিক্ষয় হয় যখন $\phi = 0$ অর্থাৎ $\cos\phi = 1$, এই অবস্থায় $E = E_0$।

ভরকেন্দ্র কাঠামোর বিক্ষেপণ কোণ ϕ এবং ল্যাবরেটরী কাঠামোর বিক্ষেপণ কোণ θ এর মধ্যে একটি সম্বন্ধ সহজেই স্থাপন করা যেতে পারে।

A·2 চিত্রে ঐ কোণদ্বয়ের পারস্পরিক সম্পর্ক নির্দেশ করা হয়েছে, স্পষ্টতাই এখানে

$$\cot\theta = \frac{D}{B}$$

চিত্র A·2

এবং $$D = v_0\,\frac{M}{M+m}\cos\phi + v_0\,\frac{m}{M+m}$$

$$B = v_0\,\frac{M}{M+m}\sin\phi$$

সুতরাং এথেকে আমরা পাই

$$\cot\theta = \frac{\cos\phi + \frac{m}{M}}{\sin\phi} \qquad \cdots \quad A·8$$

গণনার সুবিধার জন্য বাঁদিকের রাশিটিকে $\cot\theta$ হিসাবে না লিখে আমরা $\cos\theta$ হিসাবে প্রকাশ করব। ঐ পরিবর্তন ঘটান যায় নিম্নলিখিত সম্বন্ধটি ব্যবহার ক'রে

$$\cos\theta = \frac{\cot\theta}{(1+\cot^2\theta)^{\frac{1}{2}}}$$

এই প্রকাশনটি A·8 সূত্রে প্রয়োগ করলে অবশেষে আমরা পাই

$$\cos\theta = \frac{1 + \frac{M}{m}\cos\phi}{\left[1 + \left(\frac{M}{m}\right)^2 + 2\frac{M}{m}\cos\phi\right]^{\frac{1}{2}}} \qquad \cdots \quad A·9$$

এবার আমরা $\cos\theta$ এর গড় পরিমাণ পেতে চাই অর্থাৎ গড়ে কোন একটি সংঘর্ষে নিউট্রনটি L-কাঠামোতে কত কোণে বিক্ষুরিত হচ্ছে তার পরিমাণ। এই গড় নির্ণয় করতে হবে C-কাঠামোর সমস্ত সম্ভাব্য বিক্ষুরণ কোণ ϕ এর উপর গড় নিয়ে। গড় সহজেই নির্ণয় করা যায় যদি আমরা ধ'রে নিই যে C-কাঠামোতে বিক্ষুরণ হবে সমভাবসম্পন্ন অর্থাৎ বর্তুলাকারে প্রতিসম। দেখা যায় যে অপেক্ষাকৃত স্বল্পশক্তির নিউট্রন যেগুলি পারমাণবিক চুল্লীর ভিতর ক্রিয়াশীল তাদের ক্ষেত্রে উপরোক্ত ধারণা নির্ভুল। সুতরাং গড় নির্ণয়ের সূত্রানুসারে আমরা পাই

$$\overline{\cos\theta} = \frac{\int \cos\theta \, d\Omega}{\int d\Omega} = \frac{1}{4\pi}\int_0^\pi \cos\theta \, 2\pi \sin\phi \, d\phi$$

$$= \frac{1}{2}\int_0^\pi \frac{(1 + M/m \cos\phi)\sin\phi \, d\phi}{\left[1 + \left(\frac{M}{m}\right)^2 + 2\frac{M}{m}\cos\phi\right]^{\frac{1}{2}}}$$

$$= \frac{1}{2}\int_{-1}^{+1} \frac{1 + \frac{M}{m}x}{\left[1 + \left(\frac{M}{m}\right)^2 + 2\frac{M}{m}x\right]^{\frac{1}{2}}} \, dx = \frac{2m}{3M} \quad \cdots \quad A\cdot 10$$

যখন $M >> m$ অর্থাৎ যখন খুব ভারী কেন্দ্রীনের সঙ্গে বিক্ষুরণ ঘটছে তখন $\overline{\cos\theta}$ এর মান হবে ক্ষুদ্র এবং L-কাঠামোতে বিক্ষুরণ হবে প্রায় সমভাবসম্পন্ন অর্থাৎ যতগুলি নিউট্রন পিছনের দিকে বিচ্যুত হবে ঠিক ততগুলিই সামনের দিকে বিক্ষুরিত হবে।

এইবার আমরা প্রতি সংঘর্ষপিছু গড়ে কত শক্তিক্ষয় ঘটবে তা গণনা করতে পারি। গণনার সুবিধার জন্য আমরা নূতন একটি শক্তির অপেক্ষক বিচার করব, এটি হ'ল $\ln\frac{E_0}{E}$, এবং এর গড় পরিমাণকে বলা হবে ζ।

$$\zeta = \overline{\ln\frac{E_0}{E}} = \overline{\ln E_0 - \ln E} \quad \cdots \quad A\cdot 11$$

$\overline{\ln\frac{E_0}{E}}$ রাশিটি নিউট্রনের শক্তি নিরপেক্ষ এজন্য বিক্ষুরণের পরীক্ষায় এটির প্রয়োগ বিশেষ সুবিধাজনক। A·4 সূত্র থেকে দেখা যায় যে E/E_0

এবং cos ϕ এর পরস্পরের মধ্যে সরল অনুপাত বিদ্যমান। যেহেতু cos ϕ এর যাবতীয় পরিমাণই সমান সম্ভাব্য, আমরা সিদ্ধান্ত করতে পারি যে E/E_0 এর সমস্ত পরিমাণও সমান সম্ভাব্য। একটি সংঘর্ষের পর যে E_0 প্রাথমিক শক্তিবিশিষ্ট একটি নিউট্রনের শক্তি E এবং $E+dE$ এর মধ্যে থাকবে তার সম্ভাব্যতা হ'ল

$$PdE=\frac{dE}{E_0(1-r)}$$

এখানে E_0 এবং rE_0 দুই প্রান্তিক শক্তির সীমা যার অভ্যন্তরে যেকোন শক্তি নিউট্রনটি একটি সংঘর্ষের পর গ্রহণ করতে পারে। A·11 সংজ্ঞাটিকে এবার নিম্নলিখিত গাণিতিক উপায়ে উপস্থাপিত করা যায়

$$\zeta=\int_{rE_0}^{E_0} ln\frac{E_0}{E}PdE=\int_{rE_0}^{E_0}\left(ln\frac{E_0}{E}\right)\frac{dE}{E_0(1-r)}$$

যদি $x=E/E_0$ লেখা যায় তবে

$$\zeta=\frac{1}{1-r}\int_1^r ln\, x\, dx$$

সুতরাং

$$\zeta=1+\frac{r}{1-r}ln\, r$$

$$=1+\frac{\left(\frac{M-m}{M+m}\right)^2 ln\left(\frac{M-m}{M+m}\right)^2}{1-\left(\frac{M-m}{M+m}\right)^2} \qquad \cdots \quad A\cdot 12$$

এথেকে দেখা যায় যে ζ রাশিটি সম্পূর্ণই নিউট্রনের শক্তি নিরপেক্ষ। A·12 সমীকরণটিকে সরল করলে দাঁড়ায়

$$\zeta=1-\frac{\left(\frac{M}{m}-1\right)^2}{\frac{2M}{m}}\cdot ln\left(\frac{M+m}{M-m}\right) \qquad \cdots \quad A\cdot 13$$

যখন $M/m>10$ তখন একটি মোটামুটি নির্ভুল সহজীকরণ হবে

$$\zeta=\frac{2}{\frac{M}{m}+\frac{2}{3}}$$

যখন $\frac{M}{m}=1$ এবং $\frac{M}{m}\rightarrow\infty$ সেইসকল বিশেষ ক্ষেত্রে A·12 সমীকরণটি আর প্রযোজ্য হয় না কারণ তখন ডানদিকের প্রকাশনটি হয়ে পড়ে অনির্দিষ্ট (indeterminate). তবে প্রচলিত গাণিতিক উপায়ে ঐ অনির্দিষ্ট প্রকাশনগুলিও গণনা করা সম্ভব, এইভাবে যখন $M/m=1$ তখন $\zeta=1$। এর অর্থ হ'ল যে হাইড্রোজেন কেন্দ্রীনের সঙ্গে সংঘর্ষে একটি নিউট্রনের শক্তি গড়ে $e=2{\cdot}72$ গুণকের দ্বারা হ্রাস পায়, অর্থাৎ একটি সংঘর্ষের পর প্রাথমিক শক্তির তুলনায় 37% শক্তি কম হয়। A·6 সূত্রে যদি $r=0$ এবং $\cos\phi=-1$ প্রয়োগ করা যায় তবে আমরা পাই $E=0$। অর্থাৎ হাইড্রোজেন কেন্দ্রীনের সঙ্গে মুখোমুখি সংঘর্ষে নিউট্রনটি এর সমস্ত শক্তি ক্ষয় ক'রে ফেলতে পারে। দশম অধ্যায়ে নিউট্রন আবিষ্কারের বর্ণনা দেবার সময় এই সম্ভাবনা আমরা পর্য্যালোচনা করেছি। যখন $M/m\rightarrow\infty$ তখন $\zeta\rightarrow0$, এবং নিউট্রনটি তখন কোন শক্তি নষ্ট করে না।

ζ এর পরিমাণ জ্ঞাত থাকলে নির্দিষ্ট পরিমাণ শক্তি হ্রাস করার জন্য গড়ে কতগুলি সংঘর্ষের প্রয়োজন হয় তা সহজেই গণনা করা যায়। যদি 2 এমইভি শক্তির নিউট্রন নিয়ে শুরু করা যায় এবং এগুলিকে শ্লথ ক'রে 0·025 ইভি শক্তিতে নিয়ে আসার প্রয়োজন হয় (যেমন প্রয়োজন হয় পারমাণবিক চুল্লীর ভিতর) তবে সেক্ষেত্রে শক্তিক্ষয়ের লগ (logarithm) হবে

$$ln\,(2\times10^6/0{\cdot}025)$$

যেহেতু প্রতি সংঘর্ষে গড় লগ শক্তিক্ষয়ের পরিমাণ হয় ζ, সুতরাং এক্ষেত্রে মোট সংঘর্ষের সংখ্যা হবে

$$ln\left(\frac{2\times10^6}{0{\cdot}025}\right)/\zeta=\frac{18{\cdot}2}{\zeta} \qquad \cdots \quad A{\cdot}14$$

A·12 সূত্রের দ্বারা ζ গণনা ক'রে তারপর তার সাহায্যে উপরোক্ত পরিমাণ শক্তি হ্রাসনের জন্য প্রয়োজনীয় নির্দেশ সংঘর্ষের সংখ্যা গণনা করা যায় এবং এভাবে 11·2 সারণীটি প্রস্তুত করা হয়েছে।

উদাহরণ: ডিউটেরিয়াম অক্সাইড (ভারী জল) হ্রাসকের ভিতর তাপীয় শক্তিতে উপনীত হতে একটি 2 এমইভি নিউট্রনের ডিউটেরিয়াম কেন্দ্রীনের সাথে সাথে গড়ে কতগুলি সংঘর্ষের প্রয়োজন হবে?

নির্দের সংঘর্ষের সংখ্যা A·14 সূত্রের দ্বারা প্রদত্ত ; এক্ষেত্রে

$$r=\left(\frac{2-1}{2+1}\right)^2=0{\cdot}11$$

এবং

$$\zeta=1+\frac{r}{1-r}\ln r$$

$$=1+\frac{0{\cdot}11\times 2{\cdot}3026}{1-0{\cdot}11}\log_{10}0{\cdot}11$$

$$=0{\cdot}726$$

সুতরাং গড়ে মোট সংঘর্ষের সংখ্যা

$$=\frac{18{\cdot}2}{\zeta}=\frac{18{\cdot}2}{0{\cdot}726}=25.$$

পরিশিষ্ট 3

গ্রীক বর্ণমালা

Α	α	alpha	আলফা	Ν	ν	nu	নিউ
Β	β	beta	বিটা	Ξ	ξ	xi	ক্সাই
Γ	γ	gamma	গ্যামা	Ο	ο	omicron	ওমিক্রন
Δ	δ	delta	ডেলটা	Π	π	pi	পাই
Ε	ε	epsilon	ইপ্‌সিলন	Ρ	ρ	rho	রো
Ζ	ζ	zeta	জেটা	Σ	σ	sigma	সিগমা
Η	η	eta	ইটা	Τ	τ	tau	টাও
Θ	θ	theta	থেটা	Υ	υ	upsilon	উপ্‌সিলন
Ι	ι	iota	আয়োটা	Φ	φ	phi	ফাই
Κ	κ	kappa	কাপ্পা	Χ	χ	chi	কাই
Λ	λ	lamda	ল্যামডা	Ψ	ψ	psi	সাই
Μ	μ	mu	মিউ	Ω	ω	omega	ওমেগা

পরিশিষ্ট 4

পারমাণবিক ভরের সারণী

পারমাণবিক সংখ্যা এবং মৌলচিহ্ন	ভরসংখ্যা	ভর (একাইউ, O^{16} একক)	মৌলচিহ্ন এবং Z	ভরসংখ্যা	ভর (একাইউ, O^{16} একক)
$_{0}n$	1	1·008982	$_{19}K$	39	38·975930
$_{1}H$	1	1·008143	$_{20}Ca$	40	39·975330
	2	2·014735	$_{22}Ti$	48	47·96405
	3	3·017005	$_{23}V$	51	50·95953
$_{2}He$	3	3·016977			
	4	4·003873	$_{24}Cr$	52	51·95693
$_{3}Li$	6	6·017021	$_{25}Mn$	56	55·95683
	7	7·018223	$_{26}Fe$	56	55·95286
$_{4}Be$	9	9·015043	$_{27}Co$	59	58·95182
	10	10·016706	$_{28}Ni$	58	57·95360
$_{5}B$	11	11·012789	$_{29}Cu$	63	62·94962
$_{6}C$	12	12·003804	$_{49}In$	115	114·94207
	13	13·007473			
	14	14·007682	$_{82}Pb$	206	206·03859
$_{7}N$	14	14·007515		207	207·04037
	15	15·004863		208	208·04140
$_{8}O$	16	16·000000		210	210·04958
	17	17·004533		211	211·05450
	18	18·004874		212	212·05791
$_{9}F$	19	19·004456	$_{83}Bi$	209	209·04550
$_{10}Ne$	20	19·998760	$_{84}Po$	209	209·04750
	21	21·000589	$_{86}Rn$	212	212·05621
	22	21·998270		222	222·08663
$_{11}Na$	23	22·997047	$_{88}Ra$	226	226·09574
$_{12}Mg$	24	23·992638	$_{90}Th$	232	232·10180
	25	24·993747	$_{92}U$	233	233·11693
$_{13}Al$	27	2·9990080		235	235·11865
$_{14}Si$	28	27·98577		236	236·11912
$_{15}P$	31	30·983563		238	238·12644
$_{16}S$	32	31·982190	$_{94}Pu$	241	241·13154
				239	239·12653
$_{17}Cl$	35	34·97996	$_{93}Np$	237	237·12158
	37	36·997540		239	239·12730
$_{18}A$	40	39·975100	$_{95}Am$	241	241·13151

পরিশিষ্ট 5

মৌলিক কণাদের ধর্মাবলী

কণা	গড় জীবনকাল (সেকেণ্ড)	ক্ষয়ের ধরণ ও ভগ্নাংশ		ভর (এমইভি)	ঘূর্ণি ($\hbar$)
p	স্থায়ী			938·256	$\frac{1}{2}$
n	$0·92 \times 10^{3}$	$pe^{-}\nu$	1	939·552	$\frac{1}{2}$
e^{+}, e^{-}	স্থায়ী			0·511	$\frac{1}{2}$
Λ	$2·5 \times 10^{-10}$	$p\pi^{-}$	0·653	1115·6	$\frac{1}{2}$
		$n\pi^{0}$	0·347		
		$pe\nu$	$0·81 \times 10^{-4}$		
		$p\mu\nu$	$1·35 \times 10^{-4}$		
Σ^{+}	$0·80 \times 10^{-10}$	$p\pi^{0}$	0·52		
		$n\pi^{+}$	0·47	1189·40	$\frac{1}{2}$
		$p\gamma$	$1·24 \times 10^{-3}$		
		$n\pi^{+}\gamma$	$1·31 \times 10^{-4}$		
Σ^{0}	$<1·0 \times 10^{-14}$	$\Lambda\gamma$	1	1192·48	
		$\Lambda e^{+}e^{-}$	5×10^{-3}		
Σ^{-}	$1·48 \times 10^{-10}$	$n\pi^{-}$	1	1197·3	$\frac{1}{2}$
		$ne^{-}\nu$	$1·08 \times 10^{-3}$		
		$n\mu^{-}\nu$	$0·4 \times 10^{-3}$		
		$\Lambda e^{-}\nu$	$0·6 \times 10^{-4}$		
Ξ^{0}	$3·0 \times 10^{-10}$	$\Lambda\pi^{0}$	1	1314·7	$\frac{1}{2}$
		$p\pi^{-}$	$<0·9 \times 10^{-3}$		
Ξ^{-}	$1·66 \times 10^{-10}$	$\Lambda\pi^{-}$	1	1321·3	$\frac{1}{2}$
		$\Lambda e^{-}\nu$	$0·6 \times 10^{-3}$		

কণা	গড় জীবনকাল (সেকেণ্ড)	ক্ষয়ের ধরণ ও ভগ্নাংশ		ভর (এমইভি)	ঘূর্ণি ($\hbar$)
$\mu^{\pm}$	2.2×10^{-6}	$e\nu\nu$	1		
		$e\gamma\gamma$	$<1.6 \times 10^{-5}$	105.65	$\frac{1}{2}$
$\pi^{\pm}$	2.6×10^{-8}	$\mu\nu$	1		
		$e\nu$	1.2×10^{-4}	139.57	0
		$\mu\nu\gamma$	1.24×10^{-4}		
		$\pi^0 e\nu$	1.02×10^{-8}		
π^0	0.9×10^{-16}	$\gamma\gamma$	0.988		
		$\gamma e^+ e^-$	0.017	134.97	0
		$e^+ e^- e^+ e^-$	3.4×10^{-5}		
$K^{\pm}$	1.23×10^{-8}	$\mu\nu$	0.635		
		$\pi^{\pm}\pi^0$	0.21		
		$\pi^{\pm}\pi^+\pi^-$	0.055	493.72	0
		$\pi^{\pm}\pi^0\pi^0$	0.017		
		$\pi^0\mu^{\pm}\nu$	0.031		
		$\pi^0 e^{\pm}\nu$	0.048		
		$e\nu$	1.2×10^{-5}		
		$\pi^{\pm}\pi^0\gamma$	2.6×10^{-4}		
		$\pi^{\pm}e^+e^-$	$<0.4 \times 10^{-6}$		
		$\pi\gamma\gamma$	$<3.5 \times 10^{-5}$		
		$\pi^{\pm}\pi^+\pi^-\gamma$	10^{-4}		
		$\pi^{\pm}\pi^{\mp}\mu^{\pm}\nu$	1.0×10^{-5}		
		$\pi\mu^+\mu^-$	$<2.4 \times 10^{-6}$		

শব্দসূচী এবং পরিভাষা

শুদ্ধিপত্র

পৃঃ 92

"1862 এমইভি" এর স্থানে "1876 এমইভি"

পৃঃ 109

"$6 \sim 8 \times 10^{-12}$ সেমি" এর স্থানে "$6 \sim 8 \times 10^{-13}$ সেমি"

পৃঃ 127

"যোজকটির" এর স্থানে "সমাকলটির"

পৃঃ 128

"তির্য্যক্ ভরবেগ" এর স্থানে "ব্যাসমুখী ভরবেগ"

পৃঃ 127 এবং 129

"মেরুকেন্দ্রীক" এর স্থানে "ফোকাস কেন্দ্রীক"

পৃঃ 129

"$\phi = 0$ এবং 2π" এর স্থানে "$\phi = 0$ এবং π"

পৃঃ 165

"$\mu_{m_I} = I = g_I I \frac{eh}{2m_e c}$" এর স্থানে "$\mu_{m_I = I} = g_I I \frac{eh}{2m_e c}$"

পৃঃ 189

"$m_0 c^2 \left\{ \frac{1}{(1 - v^2/c^2)^{-\frac{1}{2}}} \right\}$" এর স্থানে "$m_0 c^2 \left\{ \frac{1}{(1 - v^2/c^2)^{\frac{1}{2}}} - 1 \right\}$"

পৃঃ 389, চিত্র 11·5

"$\frac{\sigma_f(U^{235})}{\sigma_t(U)}$" এর স্থানে "$\frac{\sigma_f(U)}{\sigma_t(U)}$"

পৃঃ 430, চিত্র 12·11

"মেঘকক্ষ" এর স্থানে "গণনকার"